



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

## VLIV VYSOKÉHO NAPĚTÍ NA RŮZNÉ MATERIÁLY V NÍZKÉM A VYSOKÉM VAKUU

INVESTIGATION OF HIGH VOLTAGE INFLUENCE ON DIFFERENT MATERIALS IN HIGH AND LOW  
VACUUM

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Matúš Šedivý

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Edita Hejátková

BRNO 2017

# Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor **Mikroelektronika**

Ústav mikroelektroniky

**Student:** Bc. Matuš Šedivý

**ID:** 154884

**Ročník:** 2

**Akademický rok:** 2016/17

## NÁZEV TÉMATU:

**Vliv vysokého napětí na různé materiály v nízkém a vysokém vakuu**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Porovnejte vliv vysokého napětí na různé materiály v nízkém a vysokém vakuu v rozmezí od 50 Pa do 4 mPa.

Předmětem zkoumání budou plastové a nevodivé materiály typu PVDF1000, PEEK, sklo, keramika aj. Primárně se zaměřte na povrch materiálu.

Cílem diplomové práce bude vytvoření závislosti tlaku/vzdálenosti na velikosti průrazného napětí. Vyberte metody měření v závislosti na tvaru elektrody a proveďte vhodné teoretické a simulační propočty.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

**Termín zadání:** 6.2.2017

**Termín odevzdání:** 25.5.2017

**Vedoucí práce:** Ing. Edita Hejátková

**Konzultant:** Ing. Jan Lásko, R&D Brno, FEI

**doc. Ing. Lukáš Fucík, Ph.D.**  
*předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Prvá časť tejto diplomovej práce obsahuje prehľad základných elektrických vlastností izolačných materiálov a bližšie popisuje materiály, pri ktorých sa zisťovala ich odolnosť voči povrchovému prierazu vo vákuu. Ďalej sa práca zameriava na teóriu mechanizmov vzniku elektrického výboja v plyných i tuhých izolantoch a poskytuje prehľad meracích metód používaných k stanoveniu elektrickej pevnosti materiálov a ich odolnosti voči plazivým prúdom. Jadrom práce je experimentálna časť, v ktorej sú popísané experimentálne merania vo vákuovej komore a ich výsledky. V závere práce sú porovnané skúmané materiály na základe výsledkov meraní a je diskutovaná ich vhodnosť pre aplikácie v komorovom vákuu a elektrónovej mikroskopii. Taktiež sú v ňom uvedené možnosti pre ďalšie práce v tejto oblasti.

## **Abstract**

The beginning of this thesis contains an overview of properties of the insulators, and description of insulators that were used for in depth research of surface breakdown in vacuum. Furthermore, this work focuses on mechanisms of an electric breakdown initiation at the interface of the solid insulator and surrounding low pressure gas. Multiple methods for measurements of dielectric strength are examined. The experimental part describes the measurements performed in the vacuum chamber. The results of these measurements are then analysed. In conclusion, used insulators are compared and suggestions for further work are given.

## **Kľúčové slová**

Vysoké napätie, Izolanty, Vákuum, Sklo, Alumina, Kapton, Polyéteréterketon, Polyvinyliden fluorid, IS400, Povrchový prieraz, Plazivé prúdy

## **Key words**

High-voltage, Insulators, Vacuum, Glass, Alumina, Kapton, Polyether ether ketone, Polyvinylidene fluoride, IS400, Surface breakdown, Tracking

## **Bibliografická citácia**

ŠEDIVÝ, M. Vliv vysokého napětí na různé materiály v nízkém a vysokém vakuu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky, 2017. 47 s., 8 s. příloh. Vedoucí diplomové práce Ing. Hejátková. Odborný konzultant Ing. Jan Lásko.

## Prehlásenie

Prehlasujem, že svoju diplomovú prácu na tému „Vliv vysokého napětí na různé materiály v nízkém a vysokém vakuu“ som vypracoval samostatne pod vedením odborného konzultanta a vedúcej práce, s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce. Ako autor uvedenej diplomovej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tohto projektu som neporušil autorské práva tretích osôb, predovšetkým som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení § 152 trestného zákona č. 140/1961 Sb.

V Brne dňa 23. mája 2017

.....  
podpis autora

## Pod'akovanie

Najskôr by som chcel poďakovať svojej rodine za ich podporu, predovšetkým maminke, ktorá mi vždy pribalila nejaký ten koláč do cesty a bratovi Jožkovi, ktorý ma vozil do Brna. Ďalej chcem poďakovať svojim kamarátom (Jurovi, Maťovi, Lukášovi, Ninuške Monike, Sebastiánovi, Márií, Hanke, Terke, Lidunke a Nikole), ktorí mi taktiež pomohli v mojom duševnom rozvoji a mali trpezlivosť s mojou nedefinovanou mentálnou deformáciou. Nesmiem zabudnúť ani na mojich kolegov a nadriadených z firmy ELEDUS, ktorí mali pochopenie pre obdobia, keď bola pre mňa škola dôležitejšia ako práca. Asi by som mal poďakovať aj všetkým, ktorí mi počas štúdia predávali svoje dlhoročné skúsenosti a rozsiahle vedomosti, ale to by bol veľmi dlhý zoznam. Preto to zredukujem len na vedúcu mojej diplomovej práce Ing. Editu Hejátkovú a konzultanta z firmy Thermo Fisher Scientific, Ing. Jana Lásku, ktorí svojimi radami prispeli k rapidnému zvýšeniu kvality tejto práce.

V Brne dňa 23. mája 2017

.....  
podpis autora

Experimentální část této diplomové práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře  
vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072

**Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX)**  
operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

# Obsah

Úvod.....	6
1 Elektrické vlastnosti izolantov .....	7
1.1 Konduktivita .....	7
1.2 Dielektrická konštanta .....	7
1.3 Stratový činiteľ .....	8
1.4 Elektrická pevnosť .....	9
1.5 Vlastnosti skúmaných materiálov.....	9
2 Problematika elektrického prierazu.....	11
2.1 Prieraz v plynoch .....	11
2.1.1 Townsendov zákon .....	12
2.1.2 Paschenov zákon .....	12
2.1.3 Prieraz vo vákuu .....	13
2.2 Prieraz v tuhých látkach .....	14
2.2.1 Čistý elektrický prieraz .....	15
2.2.2 Tepelný prieraz .....	15
2.2.3 Elektro-chemický prieraz .....	15
2.2.4 Povrchový prieraz .....	15
2.3 Metódy merania elektrickej pevnosti pevných izolantov .....	16
2.3.1 Meranie elektrickej pevnosti doskových izolantov.....	16
2.3.2 Meranie CTI (Comparative tracking index) .....	17
3 Teoretické výpočty a simulácie.....	19
3.1 Výpočet Paschenovej krivky .....	19
3.2 Popis použitého geometrického modelu.....	20
3.3 Vyhodnotenie výsledkov simulácií .....	21
4 Experimentálna časť.....	24
4.1 Popis merania .....	24
4.2 Výsledky meraní.....	27
4.2.1 Ketron 1000 PEEK .....	27
4.2.2 Sylamit 1000 PVDF .....	28
4.2.3 ISOLA IS400 .....	30
4.2.4 Vplyv nespájkovacej masky na IS400 .....	32
4.2.5 Kapton HN .....	34
4.2.6 Alumina.....	36
4.2.7 Sklo .....	38
Záver .....	39
Zoznam skratiek a symbolov .....	41
Zoznam obrázkov .....	42
Zoznam tabuliek .....	44
Zoznam literatúry.....	45
Zoznam príloh.....	47

# Úvod

Zariadenia využívajúce vákua k svojej činnosti (napríklad elektrónové mikroskopy a vákuové naprašovačky) v sebe obvykle obsahujú vysokonapäťové prvky. Samotné vákuum sa obvykle správa ako vynikajúci izolant. Keďže sa v ňom nenachádzajú takmer žiadne častice, teoreticky je možné jeho elektrickú pevnosť považovať za nekonečnú. Elektrická pevnosť izolačných materiálov používaných v konštrukciách takýchto zariadení je obvykle rádovo v desiatkach  $\text{MV}\cdot\text{m}^{-1}$ . Najväčšie riziko elektrického prierazu preto hrozí na povrchu týchto izolantov. Dôvodom je rozhranie medzi dvomi rôznymi prostrediami, na ktorom sa uplatňuje viacero javov než v samotnom vákuu či izolante. Pri návrhu týchto zariadení je tak potrebné dbať na dodržanie určitej minimálnej izolačnej vzdialenosti. Tým však môže dôjsť ku kolízií s požadovanými rozmermi iných konštrukčných prvkov, či celého zariadenia. Preto vzrastá požiadavka na aplikovanie takých izolačných materiálov, ktoré majú vyššiu odolnosť voči povrchovému prierazu.

CTI (Comparative tracking index) umožňuje porovnanie odolnosti materiálov voči plazivým prúdom. Tento údaj často uvádzajú výrobcovia v technických dokumentáciách plastových izolantov. Skúšky CTI sa však vykonávajú pri normálnych atmosférických podmienkach. Pre návrh elektroniky pracujúcej vo vákuu je preto vhodnejšie, aby boli materiály charakterizované pomocou inej meracej metódy, ktorá odpovedá podmienkam v komorovom vákuu. [1]

Ďalším prípadom, kedy hrozí vznik elektrického výboja sú oblasti veľmi nízkeho vákua (desiatky Pa). Pri týchto tlakoch a bežných konštrukčných rozmeroch (jednotky cm) dosahuje Paschenova krivka minima. Jednou z možností ako sa tomuto minimu vyhnúť, je zmenšiť vzdialenosť medzi elektródami na jednotky mm, čím sa minimum Paschenovej krivky posunie do oblasti stoviek Pa. To však môže byť opäť v rozpore s návrhovým pravidlom pre minimálnu izolačnú vzdialenosť. V praxi sa preto často musí riešiť rozpor medzi maximálnym pracovným tlakom a konštrukčnými rozmermi. [2]

Prvou úlohou tejto práce je zhrnúť poznatky z oblasti elektro-izolačných materiálov, najmä vo vzťahu k mechanizmom elektrického prierazu v plynných a pevných materiáloch. Ďalšou úlohou je spracovať v súčasnosti používanú metodiku merania elektrickej pevnosti a odolnosti voči plazivým prúdom a navrhnúť metódu merania prierazného napätia, ktorá sa použije v experimentálnej časti. Hlavnou časťou je vytvoriť závislosti prierazného napätia povrchu vybraných materiálov na tlaku, pri zvolenej vzdialenosti elektród. V závere je diskusia k nameraným výsledkom s porovnaním jednotlivých skúmaných materiálov.

# 1 Elektrické vlastnosti izolantov

## 1.1 Konduktivita

U izolantov je požadované, aby ich merná vodivosť (konduktivita) bola čo najnižšia. V prípade tuhých izolantov sa rozlišuje povrchová a vnútorná konduktivita. Veľkosť konduktivity materiálu závisí na druhu voľných nosičov elektrického náboja a ich koncentrácií v danom materiáli. Vodivosť je preto možné rozdeliť podľa druhu nosičov elektrického náboja, ktoré prispievajú k celkovej vodivosti na nasledovné zložky: elektrónovú - uplatňuje sa v silných elektrických poliach, iónovú – nosičmi náboja sú voľné (respektíve slabo viazané) ióny nečistôt, prímiesi i vlastného materiálu a elektroforetickú – nosičmi náboja sú koloidné častice. Celkovou vodivosťou je suma všetkých zložiek vodivosti, ktoré sa v konkrétnom materiáli za určitých podmienok uplatňujú. Pre jeden typ nosičov náboja je možné vyjadriť vodivosť vzťahom:

$$\gamma_i = q \cdot n_i \cdot \mu_i \quad (1)$$

kde  $n$  je koncentrácia nosičov náboja,  $q$  je elementárny náboj,  $\mu$  je driftová pohyblivosť nosičov náboja,  $i$  je index druhu nosičov náboja,  $k$  je počet rôznych druhov nosičov náboja podieľajúcich sa na vodivosti. [3]

Inverznou veličinou vodivosti je rezistivita, ktorá má v prípade izolantov praktickejší význam. Z principiálneho pohľadu primárnej funkcie izolantu možno povedať, že čím je rezistivita izolantu vyššia, tým sa jedná o kvalitnejší izolant. Taktiež je možné rezistivitu rozdeliť na vnútornú a povrchovú. Vnútorná rezistivita (merný odpor) sa zisťuje meraním odporu vzorky materiálu, ktorý je vzťahnutý k rozmerom použitej meracej sústavy. Zjednodušene platia pre rezistivitu vzťahy:

$$\rho_V = R \cdot \frac{S}{d} \quad [\Omega \cdot m] \quad (2)$$

$$\rho_P = R \cdot \frac{o}{d} \quad [\Omega] \quad (3)$$

kde  $R$  je nameraná hodnota odporu,  $S$  je prierez, ktorým prechádza meraný prúd,  $o$  je tzv. obvod medzikružia medzi dvomi kruhovými elektródami a  $d$  je vzdialenosť meracích elektród (v prípade vnútornej rezistivity je to súčasne i hrúbka v vzorky). [2][3]

## 1.2 Dielektrická konštanta

Dielektrická konštanta (relatívna permitivita) je charakteristická pre každý materiál. Závisí predovšetkým na chemickom zložení a polarizačných mechanizmoch, ktoré sa v danom dielektriku uplatňujú. Matematicky ju vyjadruje pomer absolútnej permitivity prostredia a vákua:



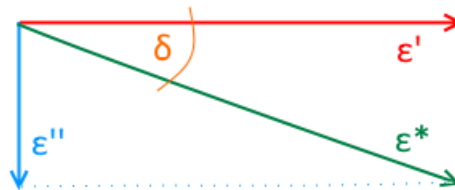
$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \quad [-] \quad (4)$$

kde  $\varepsilon_0$  je permitivita vákua a  $\varepsilon$  je absolútna permitivita prostredia. [3]

Relatívna permitivita je teda bezrozmernou veličinou. V anizotropných látkach sa jej hodnota môže líšiť podľa orientácie kryštálovej mriežky. Z dôvodu existencie rýchlych i pomalých polarizačných mechanizmov u reálneho dielektrika v striedavom poli vektor elektrickej indukcie zaostáva v čase za vektorom intenzity elektrického poľa. Pri vyšších frekvenciách vonkajšieho elektrického poľa sa prestávajú uplatňovať pomalé (relaxačné) polarizačné mechanizmy, čo vedie k zníženiu relatívnej permitivity. Chovanie reálneho dielektrika v striedavých poliach preto lepšie vystihuje komplexná permitivita vyjadrená graficky na obrázku 1.1 alebo rovnicou:

$$\varepsilon^*(j\omega) = \varepsilon'(\omega) + j\varepsilon''(\omega) \quad (5)$$

kde  $\varepsilon'$  je jej reálna zložka a  $\varepsilon''$  je imaginárna zložka, tiež nazývaná ako stratové číslo. [2] [3].



Obrázok 1.1: Komplexná permitivita a jej zložky

### 1.3 Stratový činiteľ

Stratový činiteľ je mierou tepelných strát v dielektriku pri pôsobení striedavého elektrického poľa. Je to bezrozmerná veličina. V praxi sa využíva pre posúdenie kvality dielektrického materiálu. Závisí na frekvencií, teplote i napätí. Straty v izolante možno rozdeliť na vodivostné, polarizačné a ionizačné straty. Vo väčšine prípadov sa výsledný stratový činiteľ uvažuje ako súčet vodivostného a polarizačného príspevku:

$$\tan \delta = \tan \delta_v + \tan \delta_p = \frac{\gamma}{\omega \varepsilon' \varepsilon_0} + \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad [-] \quad (6)$$

Vodivostné straty sú spôsobené vnútornou a povrchovou konduktivitou a vyskytujú sa ako v striedavom, tak i v jednosmernom poli. Polarizačné straty sa prejavujú iba v striedavom elektrickom poli. Významné sú u pevných izolantov, v ktorých prevládajú pomalé polarizačné mechanizmy. Posledným typom strát sú ionizačné, ktoré sú spôsobené výbojovou činnosťou v plynch a dutinkách. [3]

## 1.4 Elektrická pevnosť

Elektrická pevnosť je jedna z najdôležitejších charakteristických vlastností izolantu. Prekročením napätia nad hranicu určenú elektrickou pevnosťou dochádza k vzniku elektrického výboja. To sa prejaví náhlym zvýšením konduktivity. Sprievodnými javmi výboja sú napríklad: koróna, čiastočné a plazivé výboje, rast vodivých „stromčekov“ a emisia UV žiarenia. Elektrické výboje môžeme rozdeliť podľa prostredia, v ktorých vzniknú, podľa ich účinkov a podľa príčin ich vzniku. Termín preskok sa používa v prípade výboja v kvapalných a plyných izolantoch. V prípade pevných izolantov ide o prieraz, ktorý sa vyznačuje ireverzibilnou degradáciou izolantu. U vysokonapäťových aplikácií je preto hodnota elektrickej pevnosti jedným z hlavných kritérií pre výber izolačného materiálu. Matematicky možno vyjadriť elektrickú pevnosť vzorcom:

$$E_p = \frac{U_z}{d} \quad (7)$$

kde  $U_z$  je tzv. zápalné alebo prierazné napätie a  $d$  je vzdialenosť elektród, respektíve hrúbka skúšaného izolantu. [2]

V homogénnych elektrických poliach teda elektrická pevnosť predstavuje intenzitu elektrického poľa, pri ktorej dôjde k prierazu či preskoku. Z praktických dôvodov sa elektrická pevnosť často udáva v jednotkách kV/mm. Hodnota elektrickej pevnosti sa môže vplyvom starnutia materiálu meniť. Napríklad anorganické izolanty sú obvykle časovo stabilnejšie ako organické. Ďalej táto veličina silne závisí na podmienkach okolitého prostredia, najmä na teplote, tlaku a vlhkosti. V neposlednom rade je elektrická pevnosť závislá i na homogenite a časovom priebehu elektrického poľa, ktoré pôsobí na izolant. Napríklad v prípade homogénneho poľa budeného jednosmerným napätím je elektrická pevnosť obvykle vyššia ako v prípade striedavého napätia a nehomogénneho poľa. Preto sa pre objektívne stanovenie elektrickej pevnosti vykonávajú skúšky podľa príslušných noriem. [2][3]

## 1.5 Vlastnosti skúmaných materiálov

V tejto kapitole sú zhrnuté základné vlastnosti materiálov, ktoré budú predmetom skúmania tejto práce. Z pohľadu elektrického prierazu sú dôležité predovšetkým hodnoty elektrickej pevnosti a CTI, ktoré sú uvedené v tabuľke 1.1.

Sklo patrí medzi anorganické izolačné materiály. Základnou stavebnou zložkou väčšiny skiel je oxid kremičitý. Pre dosiahnutie požadovaných vlastností sa pri ich výrobe používajú prímеси, ktorými sú najčastejšie oxidy kovov. Tak je možné vytvoriť viac ako 500 rôznych druhov skiel. V elektrotechnike sa najčastejšie používajú bezalkalické sklá a takzvané E-sklo. [1]

Ketron 1000 PEEK (Polyetherketon) je semikryštalický termoplast. Má vysokú mechanickú pevnosť a tuhosť aj pri vyšších teplotách (pracovná teplota až do 310 °C). Je odolný voči ionizujúcemu žiareniu a hydrolyze. Rozpúšťa sa iba v koncentrovanej kyseline sírovej. [4][5]

Sylamit 1000 PVDF je vysokokryštalický fluoropolymer s vysokou chemickou odolnosťou. Súčasne má dobré mechanické, tepelné a elektrické vlastnosti. Jeho vlastnosti ho predurčujú pre aplikácie v chemickom, farmaceutickom, metalurgickom, potravinárskom a textilnom priemysle. [6]

IS400 je materiál určený pre viacvrstvové DPS s požiadavkou na vysokú spoľahlivosť. Má vysokú odolnosť voči delaminácií a teplota jeho rozkladu je až 330 °C. Ako výstuž využíva tkané vlákna z E-skla. [7]

RO4003C je uhl'ovodíkovo-keramický nízkostratový laminát vystužený skleným vláknom, určený pre vysokofrekvenčné aplikácie. Tento materiál je tuhý termoset, takže pri výrobe DPS je možné využiť rovnaké procesy ako pri spracovaní FR-4. Má nízky teplotný koeficient permitivity a podobný teplotný koeficient rozťažnosti ako meď. [8]

Kapton HN je polyimidový (PI) film používaný v širokom rozsahu pracovných teplôt od -269 do 400 °C. Vyrába sa v hrúbkach od 7,5 do 125 µm. Má dobrú chemickú odolnosť a nerozpúšťa sa v žiadnom známom organickom rozpúšťadle. Je samozhášavý a vyhovuje štandardu UL94 V-0. V elektrotechnike sa používa ako izolátor káblov a cievok a ako flexibilný substrát pre plošné spoje. Svoje uplatnenie nachádza v kryogenike, röntgenovej, vákuovej, leteckej a vesmírnej technike. [9]

Alumina je v elektrotechnike jeden z najpoužívanejších druhov keramiky, práve vďaka jej výborným elektro-izolačným vlastnostiam. Jej základnou zložkou je oxid hlinitý ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). Je možné ju použiť i v aplikáciách, kde je požadovaný dobrý odvod tepla a vysoký pracovný kmitočet. Zároveň ide o ľahko dostupný materiál s relatívne nízkou cenou. Okrem toho má dobrú chemickú odolnosť a oproti plastom niekoľkonásobnú tepelnú odolnosť. [10]

*Tabuľka 1.1 Prehľad elektrických vlastností skúmaných materiálov*

Materiál	$E_p$ [kV/mm]	$\rho_v$ [ $\Omega \cdot \text{cm}$ ]	$\rho_p$ [ $\Omega$ ]	$\epsilon_r$ [-]	$\text{tg} \delta$ [-]	CTI [V]
<b>PVDF 1000</b>	18	$>10^{14}$	$>10^{13}$	6	0,165	600
<b>PEEK 1000</b>	24	$>10^{14}$	$>10^{13}$	3,2	0,002	150
<b>IS400</b>	$>50$	$4 \cdot 10^{14}$	$3 \cdot 10^{12}$	4	0,02	175-250
<b>RO4003C</b>	31,2	$1,7 \cdot 10^{16}$	$4,2 \cdot 10^{15}$	3,38	0,0027	600
<b>Sklo</b>	-	$10^{13}$	-	3,8–10	0,001	-
<b>Alumina</b>	16,7	$>10^{14}$	-	9,1	0,0007	-
<b>Kapton HN</b>	240	$1,5 \cdot 10^{17}$	-	3,3-3,5	0,002	100-175

## 2 Problematika elektrického prierazu

### 2.1 Pieraz v plynoch

Vodivosť plynov spôsobujú voľné nosiče náboja, ktorými sú spravidla elektróny a kladné ióny plynu. Tie vznikajú pri ionizácii neutrálnych molekúl plynu žiarením z prostredia. Väčšinou ide o žiarenie s pomerne vysokou energiou ako je napríklad röntgenové alebo gama žiarenie. Táto situácia je ilustrovaná na obrázku 2.1. Keďže za normálnych podmienok je intenzita žiarenia s dostatočnou energiou k ionizácii molekúl plynu slabá, je i koncentrácia takto generovaných nosičov nízka. Preto sú plyny v slabých elektrických poliach veľmi dobrými izolantmi.

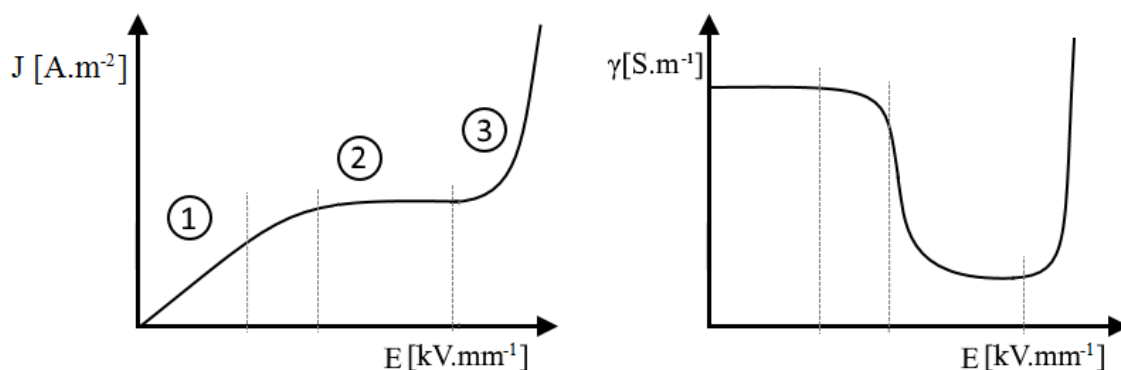


Obrázok 2.1: Fotoionizácia plynu

Voľné nosiče zanikajú buď rekombináciou alebo neutralizáciou na elektródach. Na obrázku 2.2 je závislosť prúdu na intenzite elektrického poľa medzi dvomi elektródami. Vo veľmi slabých elektrických poliach je generácia a rekombinácia voľných nosičov v rovnováhe, preto v prvej oblasti prúd rastie lineárne. Tejto oblasti sa taktiež hovorí i oblasť platnosti Ohmového zákona. V druhej časti charakteristiky je prúd takmer konštantný. Pri dostatočne silnej intenzite poľa sú voľné nosiče neutralizované na elektródach rýchlejšie, než sú ďalšie nosiče generované. Prúd je preto limitovaný rýchlosťou generácie. Tejto oblasti sa tiež hovorí oblasť nasýteného prúdu. Pre prúdovú hustotu v tejto oblasti platí:

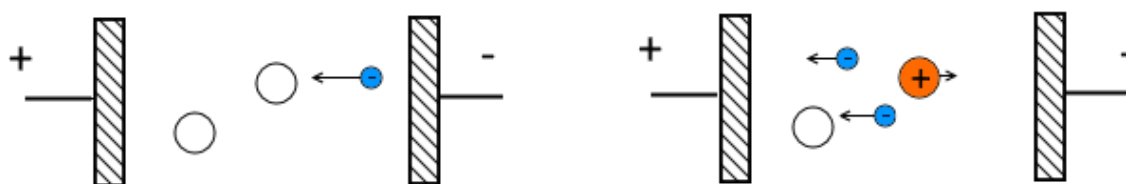
$$J = g \cdot q \cdot d \quad (8)$$

Kde  $J$  je prúdová hustota,  $g$  je koeficient generácie,  $q$  je elementárny náboj, a  $d$  je vzdialenosť elektród. [2]



Obrázok 2.2: Vodivosť plynu v silných elektrických poliach

Tretia oblasť na obrázku 2.2 je z hľadiska elektrickej pevnosti plynov najzaujímavejšia. Pri veľmi silných poliach získajú elektróny dostatočnú kinetickú energiu na to aby pri nepružnej zrážke s neutrálnym atómom plynu vyvolali takzvanú nárazovú ionizáciu (viď. obrázok 2.3 vľavo). Takto generované nosiče náboja sú následne vplyvom elektrického poľa urýchľované k elektródam. Elektróny, ktoré majú mnohonásobne nižšiu hmotnosť ako kladné ióny, získajú vysokú rýchlosť. Pri zrážke s ďalším neutrálnym atómom tak opäť môže dôjsť k nárazovej ionizácii. Táto situácia je znázornená na obrázku 2.3 vpravo. Vzniká tak lavínový efekt a exponenciálne rastie koncentrácia voľných nosičov náboja. To vedie k prudkému nárastu elektrického prúdu plynom. [2]



Obrázok 2.3: Nárazová ionizácia a lavínový efekt.

### 2.1.1 Townsendov zákon

Samotná nárazová ionizácia však nestačí k tomu, aby sa výboj udržal. Po tom, ako dôjde k neutralizácii všetkých voľných nosičov náboja na elektródach, výboj zanikne. Pre udržanie takéhoto výboja sú potrebné vonkajšie ionizačné činitele. Preto sa takéto výboje označujú ako nesamostatné. Keďže rýchlosť kladných iónov je v porovnaní s elektrónmi malá, na nárazovej ionizácii majú zanedbateľný podiel. Pri dopade na katódu však môžu vyvolať emisiu elektrónov. Tie môžu spustiť ďalšiu lavínu elektrónov. Aby takýmto spôsobom vznikol samostatný výboj je potrebné, aby bola splnená takzvaná Townsendova podmienka, ktorú je možné matematicky popísať:

$$\gamma \cdot (e^{\alpha \cdot d} - 1) = 1 \quad (9)$$

Kde  $\gamma$  je ionizačný činiteľ vyjadrujúci pravdepodobnosť emisie elektrónu dopadajúcim iónom na katódu,  $\alpha$  je ionizačný činiteľ vyjadrujúci pravdepodobnosť ionizačnej zrážky jedného elektrónu na jednotkovej dĺžke a  $d$  je vzdialenosť medzi katódou a anódou. Výraz  $(e^{\alpha \cdot d} - 1)$  teda vyjadruje počet kladných iónov, ktoré vzniknú pri prechode jedného elektrónu emitovaného z katódy na ceste k anóde, a súčin  $\gamma \cdot (e^{\alpha \cdot d} - 1)$  vyjadruje množstvo elektrónov emitovaných elektrónov týmito iónmi. Slovné vyjadrenie Townsendovej podmienky je teda: „Kladné ióny vzniknuté nárazovou ionizáciou jedného elektrónu pri jeho ceste od katódy k anóde, musia pri dopade na katódu vyvolať emisiu aspoň jedného elektrónu“. [2]

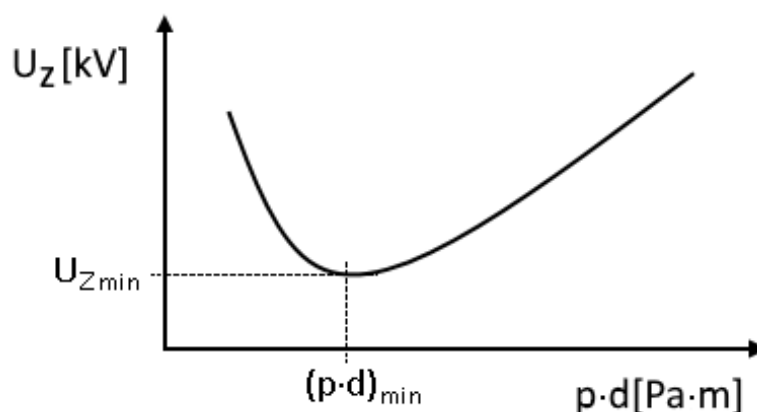
### 2.1.2 Paschenov zákon

Zápalné napätie, pri ktorom dochádza k preskoku v plyne, je funkciou súčinu tlaku a vzdialenosti elektród. Grafickým vyjadrením funkcie  $U_z = f(p \cdot d)$  je Paschenová

krivka (viď. obrázok 2.4). Pri veľmi nízkom tlaku plynu je malá pravdepodobnosť, že sa elektróny na svojej ceste k anóde zrazia s neutrálnymi molekulami plynu. Hodnota ionizačného činiteľa  $\alpha$  klesá. Pre dosiahnutie dostatočnej elektrónovej lavíny potrebnej k samostatnému výboju je preto potrebné vyššie urýchľovacie napätie a ionizácia tak prebieha energeticky nevýhodne. Zvýšiť pravdepodobnosť zrážky je možné zväčšením vzdialenosti medzi katódou a anódou. Príliš veľká vzdialenosť má však za následok pokles intenzity elektrického poľa a elektróny sú tak menej urýchľované. Pri veľmi vysokých tlakoch je pravdepodobnosť zrážky naopak príliš vysoká. Elektróny tak pružne narážajú do neutrálnych molekúl plynu skôr ako získajú potrebnú kinetickú energiu k ionizácii. Pre zvýšenie pravdepodobnosti nepružných zrážok, ktoré vedú k nárazovej ionizácii, je preto potrebné opäť zvýšiť napätie na elektródach. Pre určitý súčin tlaku plynu a vzdialenosti elektród nastávajú energeticky optimálne podmienky pre preskok. V mieste Paschenovej krivky, ktoré odpovedá týmto podmienkam, sa nachádza minimum pre zápalné napätie. Jeho hodnota je typická pre každý plyn. V tabuľke 2.1 sú uvedené typické hodnoty pre niektoré plyny. [2]

Tabuľka 2.1: Charakteristické hodnoty minima prierazného napätia a súčinu tlaku a vzdialenosti ( $p \cdot d$ ). [1]

Plyn	$(p \cdot d)_{min}$ [Pa·cm]	$U_{b min}$ [V]
Vzduch	73,3	352
Dusík (N <sub>2</sub> )	86,7	240
Kyslík (O <sub>2</sub> )	93,3	450
Neón (Ne)	533	245
Fluorid sírový (SF <sub>6</sub> )	34,7	507



Obrázok 2.4: Paschenova krivka

### 2.1.3 Prieraz vo vákuu

V porovnaní s plynným prostredím má vákuum najvyššiu možnú elektrickú pevnosť. Príčinou je skutočnosť, že sa v ňom nevyskytujú takmer žiadne častice, takže v ňom

prakticky nemôže dôjsť k lavínovému efektu vyvolaného nárazovou ionizáciou. Preto pri elektrickom prieraze vo vákuu je kľúčovým mechanizmom emisie elektrónov v elektrickom poli. Popri tom, za určitých okolností môže vo vákuu dôjsť k vzniku plynného mraku a jeho následnej ionizácii. [1]

Rôzne výskumy zaoberajúce sa vysokým napätím vo vákuu ukázali, že k výraznej emisii elektrónov dochádza už pri napätiach o jeden až dva rády nižších, než predpokladali teoretické výpočty. Tento jav sa pripisuje mikrovýstupkom na povrchu kovových elektród. Určitú úlohu zohrávajú tiež oxidy a nečistoty, najmä v prípade sekundárnej emisie elektrónov. [1]

## 2.2 Prieraz v tuhých látkach

V pevných látkach za normálnych podmienok prevláda iónová vodivosť. Ide predovšetkým o ióny prímеси a nečistôt, ale pri vyšších teplotách sa môžu na vodivosti podieľať v značnej miere i ióny vlastného materiálu. Ióny v kryštalickom izolante migrujú prostredníctvom mriežkových porúch. V amorfných látkach ako sú sklá je vodivosť závislá najmä na pohyblivosti nosičov, ktorá s teplotou rastie. Príčinou vodivosti nepolárnych polymérnych izolantov sú nečistoty a prímеси, ktoré disociujú. U polárnych polymérov je vodivosť spravidla vyššia, pretože vplyvom elektrického poľa disociujú i vlastné molekuly materiálu. Vodivosť polymérov môže výrazne ovplyvniť i vlhkosť prostredia. [3]

Ak na izolant pôsobí silné elektrické pole, jeho vodivosť vzrastie. Dochádza k odklonu od ohmového zákona. Pre vodivosť kryštalických izolantov tak platí Frenkelov empirický vzťah podľa rovnice (10). Vodivosť amorfných materiálov v silných elektrických poliach zas popisuje Pooleho empirický vzťah uvedený v rovnici (11).

$$\gamma_V = \gamma_0 \cdot e^{\beta\sqrt{E}} \quad (10)$$

$$\gamma_V = \gamma_0 \cdot e^{\beta E} \quad (11)$$

Kde  $\gamma_0$  je vnútorná konduktivita izolantu v oblasti platnosti ohmového zákona,  $\beta$  je materiálová konštanta a  $E$  je intenzita pôsobiaceho elektrického poľa. [3]

Na povrchu izolantov dochádza k disociácii molekúl nečistôt, ktorá je podporovaná absorbovanou vlhkosťou. Takto vzniknuté nosiče elektrického náboja sa môžu voľne pohybovať po povrchu materiálu. Povrchová vodivosť je teda závislá na absorbovanej vlhkosti, teplote, čistote a štruktúre povrchu izolantu. [2]

Na rozdiel od plynných izolantov, pevné izolanty sa vyznačujú ireverzibilnou degradáciou materiálu vplyvom elektrického výboja. Podľa mechanizmov, ktoré vedú k prierazu, možno prierazy tuhých izolantov rozdeliť na tri druhy. [2]

### **2.2.1 Čistý elektrický prieraz**

Čistý elektrický prieraz sa skúma pri pôsobení impulzného napätia. V oblasti vysokých intenzít elektrického poľa sa na elektrickej vodivosti značne podieľajú i voľné elektróny. Tie môžu svojimi zrážkami s atómami izolantu spôsobiť jak nárast teploty, tak i koncentrácie voľných nosičov náboja. Pri dostatočne vysokej intenzite elektrického poľa tak dochádza k prierazu. V miestach, kde je elektrické pole najmenej homogénne je vyššia pravdepodobnosť vzniku čistého elektrického prierazu. [2]

### **2.2.2 Tepelný prieraz**

K tepelnému prierazu dochádza v dôsledku lokálneho zvýšenia teploty vplyvom Joulovho tepla a dielektrických strát. Pri vysokom napätí tečie izolantom tak veľký prúd, že množstvo vznikajúceho tepla je väčšie ako množstvo odvádzaného tepla. V mieste so zvýšenou teplotou má izolant vyššiu vodivosť a tým vzrastá i množstvo stratového tepla. Dochádza k prehriatiu vzorky a prierazu. Prierazné napätie je v tomto prípade závislé na dobe pôsobenia napätia a na okolitej teplote. Vyššiu odolnosť voči tepelnému prierazu majú materiály s malým stratovým činiteľom a dobrým odvodom tepla. Oblasť poškodenia vzorky materiálu je pri skúškach vplyvom tepelného prierazu obvykle väčšia ako v prípade čistého elektrického prierazu. [2]

### **2.2.3 Elektro-chemický prieraz**

V dôsledku starnutia izolantu dochádza k poklesu elektrickej pevnosti. Niekedy sa nazýva prieraz elektrochemickým, ak k nemu došlo v dôsledku postupnej degradácie izolantu vplyvom jeho elektrického namáhania. Príčinou degradácie izolantu sú čiastočné výboje v plynových dutinkách a na rozhraní medzi izolantom a vodičom. Tie vyvolávajú svojimi účinkami chemické a fyzikálne zmeny v izolante. Anorganické materiály sú často odolnejšie voči tomuto mechanizmu starnutia než organické polyméry. [2]

### **2.2.4 Povrchový prieraz**

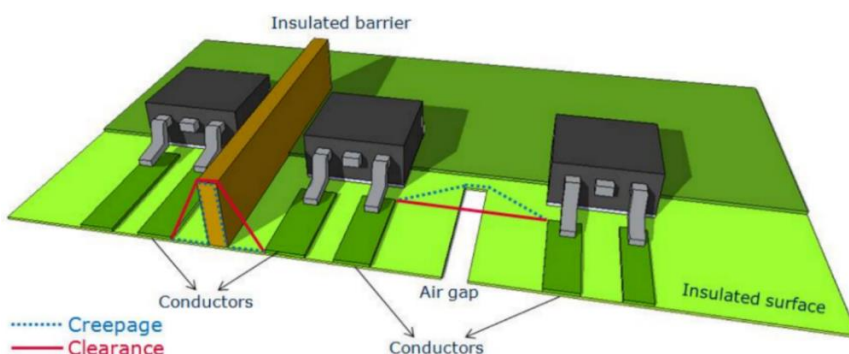
Zvláštnym prípadom elektrického prierazu je prieraz po povrchu izolantu. Takýto prieraz vzniká na rozhraní pevného a plynného prostredia, preto v sebe kombinuje mechanizmy, ktoré sa uplatňujú oboch prostrediach. V technickej praxi riziko elektrického prierazu musí byť zohľadnené napríklad pri návrhu dosiek plošných spojov (DPS).

Najvyššia deformácia elektrického poľa je v takzvanom trojitom bode, v ktorom sa stretáva kovová elektróda, tuhý izolant a plyn (alebo vákuum). Elektróny emitované z tohto bodu sú urýchlené elektrickým poľom a dopadajú na povrch izolantu. Dopadajúce elektróny vyvolávajú sekundárnu emisiu elektrónov čo spôsobuje nárast počtu elektrónov na povrchu izolantu. Dopad elektrónov a ich pohyb po povrchu spôsobujú lokálne ohriatie izolantu, pri ktorom dochádza k emisií plynu a jeho ionizácií. Súčasne dochádza k deformáciám elektrického poľa, čo vyústi v elektrický prieraz. [11][12]



Pri návrhu výkonových súčiastok a obvodov pracujúcich s vysokým napätím je nutné minimalizovať riziko vzniku elektrického prierazu. Existuje niekoľko odporúčaní ako to dosiahnuť. Najjednoduchší spôsob je maximalizovať priamu vzdialenosť (angl. clearance) a trajektóriu plazivých prúdov (creepage), medzi dvomi vodičmi (viď. obrázok 2.5 ). Oboje je možné zvýšiť vložení izolačnej prekážky medzi vodivé časti. Napríklad pri povrchovej montáži je možné zaliť vývody súčiastok silikónovou hmotou. Trajektóriu plazivých prúdov je ďalej možné predĺžiť napríklad vyrezaním drážky na puzdre medzi vývodmi výkonových súčiastok. [13][14][15]

Pre výpočet minimálnych vzdialeností je potrebné zavážiť i to v akom prostredí bude zariadenie použité, pretože vlhkosť a znečistenie povrchu zvyšujú riziko prierazu. Najnižší stupeň znečistenia je obvykle v hermeticky uzavretých zariadeniach a v čistých laboratórnych priestoroch. V ostatných prípadoch je možné použiť povlak, ktorý zabráni usádzaniu nečistôt. Ďalším návrhovým princípom je eliminovať ostré zlomy vodičov pri návrhu prepojení na DPS a na miesto nich používať zaoblenia s čo najväčším polomerom, aby nevznikali lokality s vysokým gradientom intenzity elektrického poľa. [13][15]



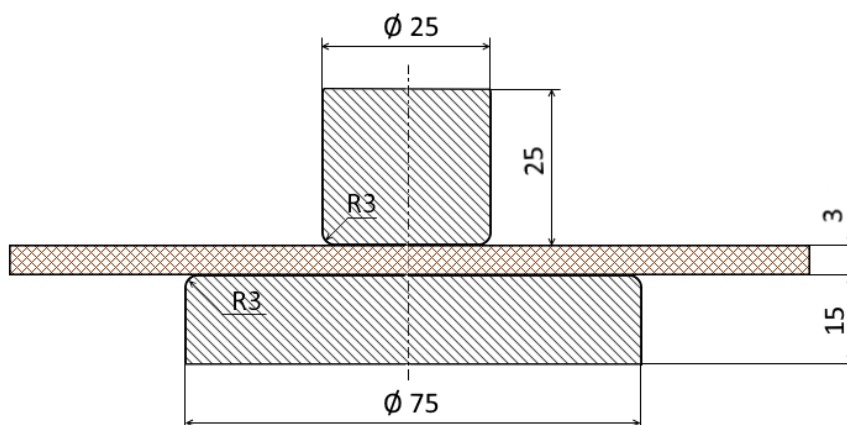
Obrázok 2.5: Najkratšia priama a povrchová trasa výboja. [15]

## 2.3 Metódy merania elektrickej pevnosti pevných izolantov

Odporúčania pre meranie elektrickej pevnosti popisujú normy ČSN EN 60243-1 až 3. Pri meraní je potrebné brať do úvahy, že vplyv na elektrickú pevnosť má časový priebeh skúšobného napätia ako i doba jeho pôsobenia. Dôvodom sú už spomínané degradačné procesy a tepelné straty v izolante, ktoré vznikajú pri namáhaní v elektrickom poli. [2]

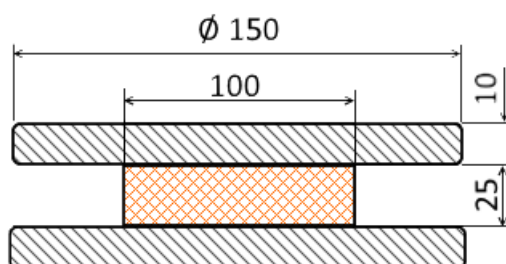
### 2.3.1 Meranie elektrickej pevnosti doskových izolantov

Elektrická pevnosť izolantov v tvare dosiek sa meria v elektródovom systéme, ktorý je zobrazený na obrázku 2.6. Elektródy musia byť sústredné, hladké, bez rýh a nečistôt a vyrobené z nekorozívneho materiálu. Vzorka izolačného materiálu nesmie byť hrubšia ako 3 mm a jej šírka musí byť väčšia ako 75 mm. [2][16]



Obrázok 2.6: Elektródový systém pre meranie elektrickej pevnosti.

Pre meranie elektrickej pevnosti v prípade povrchového prierazu sa používa elektródové usporiadanie, ktoré je znázornené na obrázku 2.7. Elektródy musia dobre priliehať na celú plochu vzorky. Musia byť dostatočne veľké, aby prekryvali vzorku minimálne o 15 mm. Na okrajoch sú zaoblené polomerom aspoň 3 mm, aby sa zamedzilo vzniku koróny na hranách. Vzorka môže mať šírku v rozmedzí 1,5–15 mm. V prípade tenkých vzoriek je dovolené vložiť medzi elektródy 2–3 vzorky tak, aby horná elektróda bola dobre podoprená. [2]



Obrázok 2.7: Elektródový systém pre meranie elektrickej pevnosti v smere rovnobežnom s povrchom vzorky

### 2.3.2 Meranie CTI (Comparative tracking index)

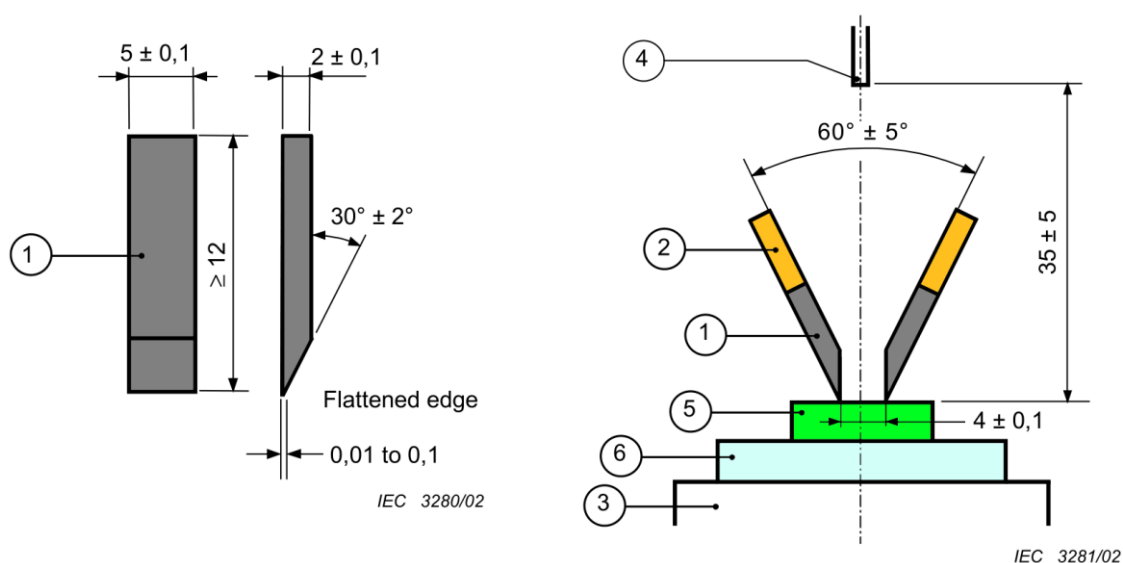
Pretože izolanty pri reálnych aplikáciách podliehajú okolitým vplyvom ako sú napríklad prach a vlhkosť, ktoré zhoršujú odolnosť voči prierazu, pri výpočte najkratšej dovolenej dĺžky trasy plazivého prúdu sa v praxi používa CTI (angl. Comparative tracking index). Materiály sa podľa hodnoty kategorizujú do tried (viď. tabuľka 2.2).

CTI sa definuje ako najvyššia hodnota napätia, pri ktorom vzorka izolantu s hrúbkou 3 mm vyhovie skúške po tom, ako je na ňu aplikovaných 50 kvapiek elektrolytického roztoku s celkovou hmotnosťou 0,997–1,147 gramu. Elektrolytickým roztokom môže byť napríklad 0,1% vodný roztok chloridu amónneho, ktorý sa nanáša po jednotlivých kvapkách každých 30 sekúnd. Ak dôjde k prierazu pred dopadom päťdesiatej kvapky, zníži sa testovacie napätie a test sa opakuje na novej vzorke. Skúškou musí prejsť 5 vzoriek testovaného materiálu, a taktiež musia vydržať napätie nižšie o 25 V po aplikovaní 100 kvapiek. [17][18]

Bližšie požiadavky na meranie CTI sú uvedené v medzinárodnej norme IEC 60112. Použité vzorky by mali mať hladký povrch, bez nečistôt, rýh a škrabancov. Kondicionovanie vzoriek by malo prebiehať po dobu 24 hodín pri teplote 18–28 °C a relatívnej vlhkosti 40–60 %. Pri teste sa odporúča použiť platínové elektródy s minimálne 99% čistotou, ktoré je možné predĺžiť mosadznými prívodmi. Elektródová sústava je znázornená na obrázku 2.8. Sklenená podložka by mala mať hrúbku aspoň 4 mm. Prítlačná sila elektród by mala byť približne 1 N. Pri teste sa používa napätie v rozsahu 100–600 V a frekvenciou 48–62 Hz. [17][18]

Tabuľka 2.2 Kategorizácia materiálu po CTI teste. [15]

Kategória	CTI [V]	príklad
1	$\geq 600$	RO4003C
2	400–600	Ertalon (nylon)
3a	175–400	FR2, FR3, FR4
3b	100–175	PEEK 1000



Obrázok 2.8: Elektródová sústava CTI testu  
1- platínová elektróda, 2- mosadzné prívody, 3- stôl, 4- špička kvapkadla,  
5- vzorka testovaného materiálu, 6- sklenená podložka [18]

### 3 Teoretické výpočty a simulácie

Experimenty zamerané na prieraz tuhých izolantov sú obvykle časovo a finančne náročné. Dôvodom sú predovšetkým degradačné účinky elektrického výboja, ktoré natrvalo menia vlastnosti testovaného izolantu. Preto je dôležité pred samotným experimentom vykonať aspoň základné simulácie a výpočty, ktoré pomôžu odhadnúť prierazné napätie.

Pre simuláciu boli zvolené dva modely. Prvý predpokladá hranolové elektródy priložené na vzorke izolantu a druhý predpokladá páskový tvar elektród. V oboch prípadoch je vzdialenosť elektród 4 mm a ich dĺžka 5 mm. Modely boli odsimulované v programe CST STUDIO SUITE 2016.

#### 3.1 Výpočet Paschenovej krivky

Pre výpočet prierazného napätia pri určitom tlaku plynu a vzdialenosti dvoch elektród sa používa rovnica, ktorá matematicky popisuje Paschenov zákon:

$$U_p = \frac{B \cdot p \cdot d}{\ln(A \cdot p \cdot d) - \ln \left[ \ln \left( 1 + \frac{1}{\gamma} \right) \right]} \quad [V] \quad (12)$$

kde  $B$  [ $V \cdot Pa^{-1} \cdot m^{-1}$ ] a  $A$  [ $Pa^{-1} \cdot m^{-1}$ ] sú experimentálne zistené konštanty plynu pri určitých podmienkach a  $\gamma$  je koeficient sekundárnej emisie. [19]

Za predpokladu stálych vonkajších podmienok (teplota, zloženie plynu) sú  $A$  i  $\gamma$  konštantné a rovnicu je možné upraviť na tvar:

$$\begin{aligned} U_p &= \frac{B \cdot p \cdot d}{\ln(p \cdot d) + \ln(B) - \ln \left[ A \cdot \ln \left( 1 + \frac{1}{\gamma} \right) \right]} = \\ &= \frac{B \cdot p \cdot d}{\ln(p \cdot d) + \ln \left[ A \cdot \ln \left( 1 + \frac{1}{\gamma} \right) \right]} = \\ &= \frac{B \cdot p \cdot d}{\ln(p \cdot d) + a} \quad [V] \end{aligned} \quad (13)$$

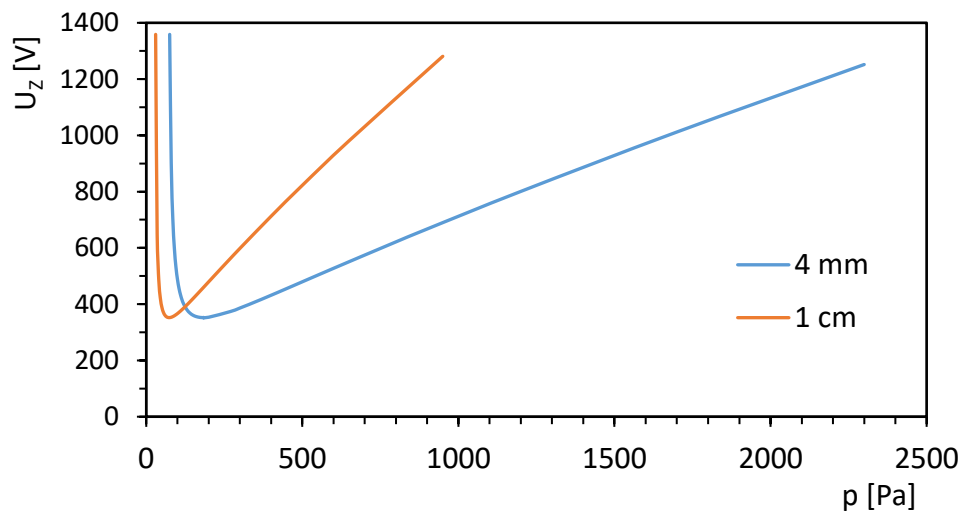
kde  $b$  je konštanta.

Výsledná hodnota čitateľa má v bode  $(p \cdot d)_{min}$  význam minima zápalného napätia. Menovateľ má v tomto bode hodnotu rovnú 1. Z hodnôt uvedených v tabuľke 2.1 je možné vypočítať konštanty  $B$  a  $a$  pre vzduch.

$$a = 1 - \ln(p \cdot d)_{min} = 1 - \ln(0,733) = 1,31 \quad [-] \quad (14)$$

$$B = \frac{U_{p \min}}{p \cdot d} = \frac{352}{0,733} = 480,22 \quad [V \cdot Pa^{-1}m^{-1}] \quad (15)$$

Dosadením vypočítaných hodnôt konštánt  $a$  a  $B$  do rovnice (13) sa vytvorila funkčná závislosť prieražného napätia na tlaku vzduchu pre vzdialenosť elektród 1 cm a 4 mm. Táto charakteristika je graficky zobrazená na obrázku 3.1. V prípade vzdialenosti elektród 4 mm sa minimum  $U_z$  nachádza v bode 183 Pa, čo odpovedá Paschenovmu zákonu, že súčin  $(p \cdot d)_{min}$  je konštantný.



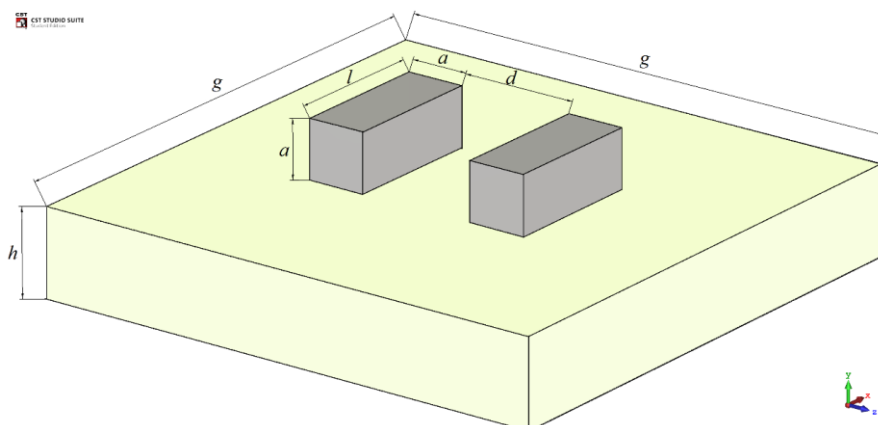
Obrázok 3.1: Závislosť prieražného napätia na tlaku plynu.

### 3.2 Popis použitého geometrického modelu

Pre simuláciu boli vytvorené 2 geometrické modely. V tabuľke 3.1 sú uvedené rozmery pre oba modely. Podkladom pre modely bolo usporiadanie elektród pri meraní CTI. Pri oboch modeloch sa predpokladal štvorcový tvar vzorky s šírkou 20 mm a hrúbkou 3 mm. Vzdialenosť elektród bola 4 mm a ich dĺžka 5 mm. Rozdiel v modeloch spočíval vo výške elektród. Pri prvom modeli sa predpokladalo použitie hranolových elektród. Tento geometrický model je zobrazený na obrázku 3.2. Druhý model predpokladal použitie medenej pásky ako elektród.

Tabuľka 3.1: Geometrické rozmery použitých modelov

značenie	rozmer [mm]	popis
$a$	2	šírka hranolovej elektródy
$b$	0,066	hrúbka Cu pásky
$d$	4	vzdialenosť elektród
$l$	5	dĺžka elektród
$g$	20	šírka/dĺžka vzorky
$h$	3	hrúbka vzorky



Obrázok 3.2: Geometrický model s hranolovými elektródami

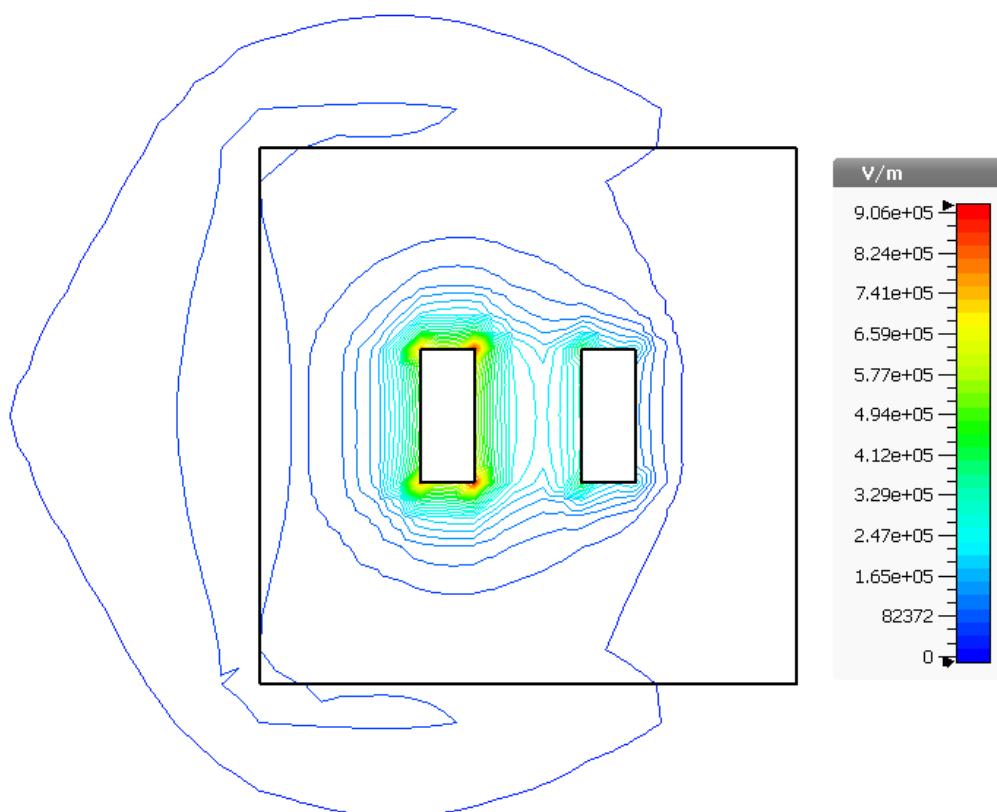
### 3.3 Vyhodnotenie výsledkov simulácií

Pre simulácie boli vybrané 2 izolanty, Alumina a RO4003C. Materiál simulovaných elektród mal vlastnosti dokonalého elektrického vodiča. Potenciál na katóde sa nastavil na 0 V a potenciál anódy na 1200 V. Okolie bolo definované ako vzduch s hraničným potenciálom 0 V. Jednoduchým výpočtom možno overiť, že ak je na elektródach vzdialených 4 mm vzájomné napätie 1200 V, intenzita elektrického poľa uprostred elektród bude  $300 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ . Pre simuláciu bola použitá šesťstenová mriežka.

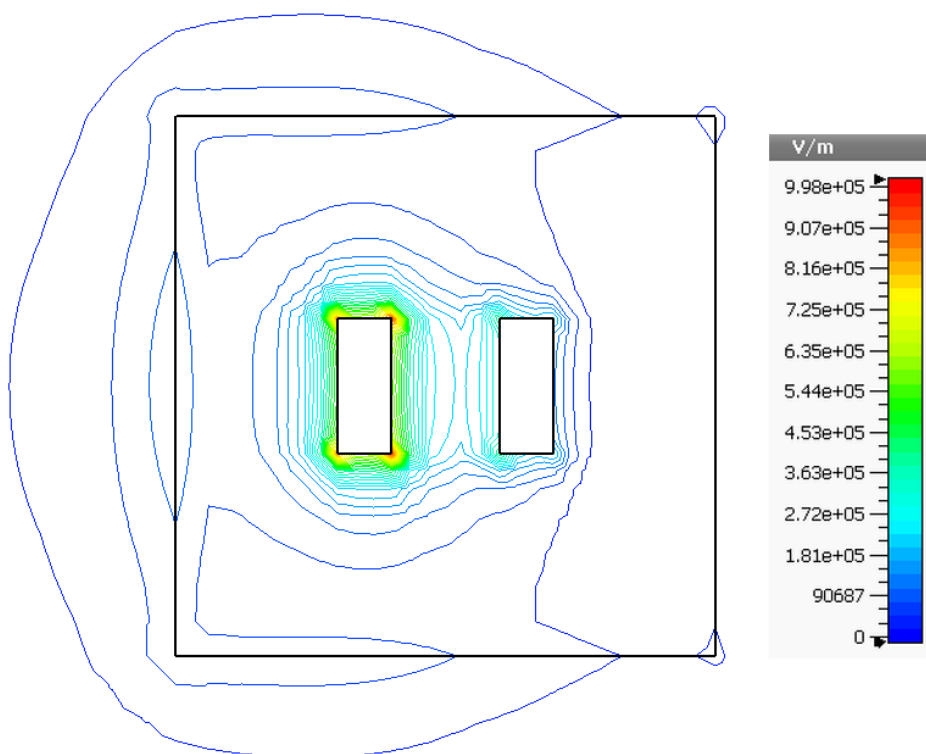
Na obrázkoch 3.3 až 3.6 je zobrazené rozloženie intenzity elektrického poľa na povrchu modelovaných vzoriek. Táto rovina bola zvolená z toho dôvodu, lebo v nej leží trojitý bod rozhrania kov-izolant-vzduch. Vo všetkých prípadoch sa výsledné hodnoty elektrickej intenzity v priestore medzi elektródami (v mieste, kde malo elektrické pole najvyššiu homogenitu) pohybovali v rozmedzí približne  $250$  až  $350 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ , čo je v súlade s predpokladanými hodnotami. Pri porovnaní grafických výsledkov je zrejmé, že tvar elektrického poľa sa výrazne zmenil pri použití iného materiálu vzorky. Dôvodom je výrazný rozdiel medzi dielektrickými konštantami týchto izolantov. Rozdiely medzi prípadmi, v ktorých boli použité elektródy rôzneho tvaru sa prejavili predovšetkým v maximálnej hodnote intenzity elektrického poľa. Napríklad pre Aluminu bol rozdiel maxim  $92 \text{ kV} \cdot \text{m}^{-1}$ , čo je v relatívnej miere približne 9 %.

Spomedzi výsledkov jednotlivých simulácií bola dosiahnutá najvyššia hodnota intenzity elektrického poľa v prípade materiálu RO4003C a modelu s páskovými elektródami. V rôznom bode anódy bola spočítaná intenzita  $1,12 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$ . Táto hodnota je asi 28 násobne menšia v porovnaní s elektrickou pevnosťou tohto materiálu.

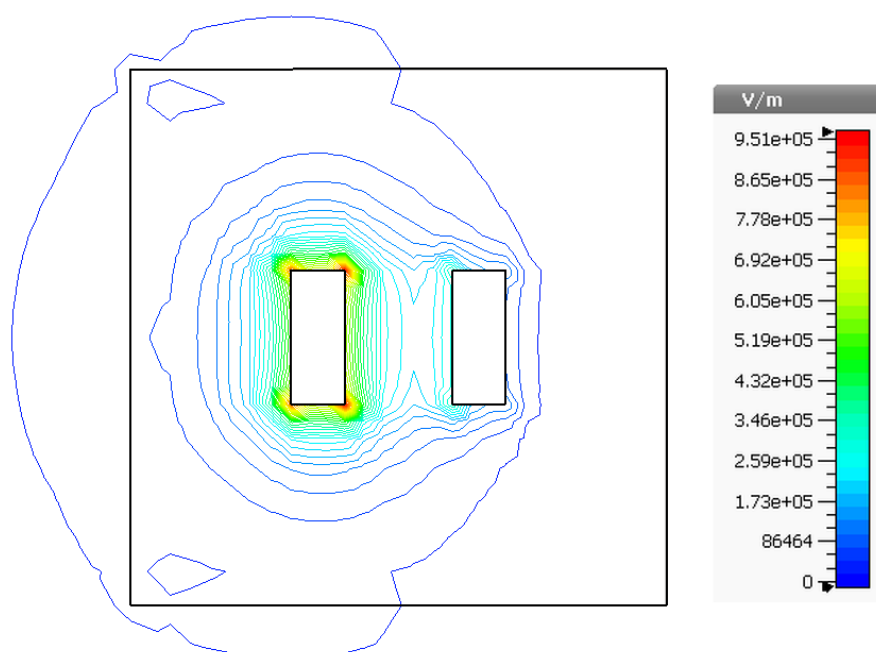
Z grafických výsledkov je zreteľné, že najvyššia hustota elektrického poľa bola vždy v okolí hrán elektród, predovšetkým na rohoch anódy, v smere ku katóde. Okrem uvedených simulácií bola vykonaná i simulácia pre vákuové okolie, avšak výsledky boli rovnaké ako v prípade vzduchu, preto sa jej výsledky v tejto práci nenachádzajú. V prílohách sú výsledky simulácií rozloženia intenzity elektrického poľa pre iné významné roviny a pre potenciál okolia 600 V.



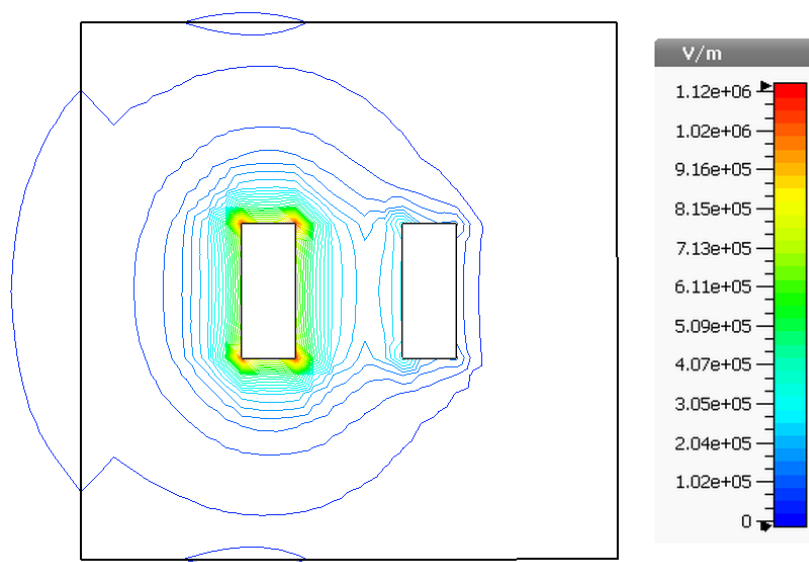
Obrázok 3.3: Rozloženie intenzity elektrického poľa na povrchu vzorky Alumíny pre hranolové elektródy



Obrázok 3.4: Rozloženie intenzity elektrického poľa na povrchu vzorky Alumíny pre páskové elektródy



Obrázok 3.5: Rozloženie intenzity elektrického poľa na povrchu RO4003C pre hranolové elektródy



Obrázok 3.6: Rozloženie intenzity elektrického poľa na povrchu RO4003C pre páskové elektródy



## 4 Experimentálna časť

Experimentálne merania boli realizované vo vákuovej komore s kovovým dnom, ktoré bolo pripojené na nulový potenciál. Sklenená časť komory sa nachádzala v ochrannej kletke z perforovaného plechu. Na čerpanie vákua bola použitá rotačná výveva Edwards XDS-10 molekulárna turbovýveva Edwards EXT 255H. Tlak v komore bol dostavovaný ihlicovým ventilom Pfeiffer EVN 116. Pre meranie tlaku vo vákuovej komore bola použitá vákuová mierka Edwards WRG-SL. Jej výstupné napätie bolo prepočítané na tlak podľa vzťahu uvedeného v jej technickej dokumentácii:

$$p = 10^{(1,5 \cdot U_{out} - 10)} \quad [Pa] \quad (16)$$

kde  $U_{out}$  je výstupné napätie mierky.

Zdrojom vysokého záporného napätia bol regulovateľný laboratórny zdroj HT 55-I. Ten pomocou vstavaného voltmetra a ampérmetra zobrazoval súčasne výstupné napätie a prúd. Ďalej umožňoval zobrazovať časový priebeh výstupného prúdu na osciloskope pomocou prevodníka s maximálnym výstupným napätím 10V, ktoré odpovedalo plnej výchylke ampérmetra na zvolenom rozsahu.

Pre sledovanie časového priebehu bol použitý osciloskop Agilent 54641D. Jeho časová doména bola nastavená na 200 ms na jeden dielik. Napät'ový rozsah sa volil podľa potreby od 5 do 50 V na jeden dielik. Celá popísaná meracia zostava je na obrázku 4.1.

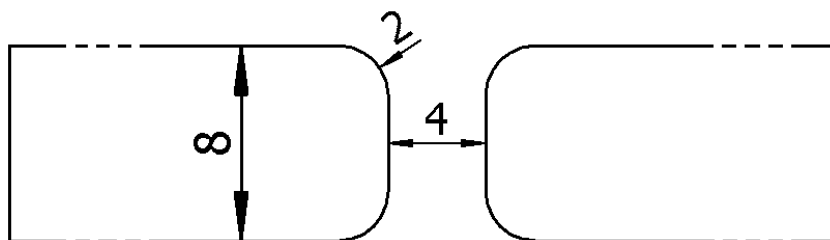


Obrázok 4.1: Fotografia meracej sústavy

### 4.1 Popis merania

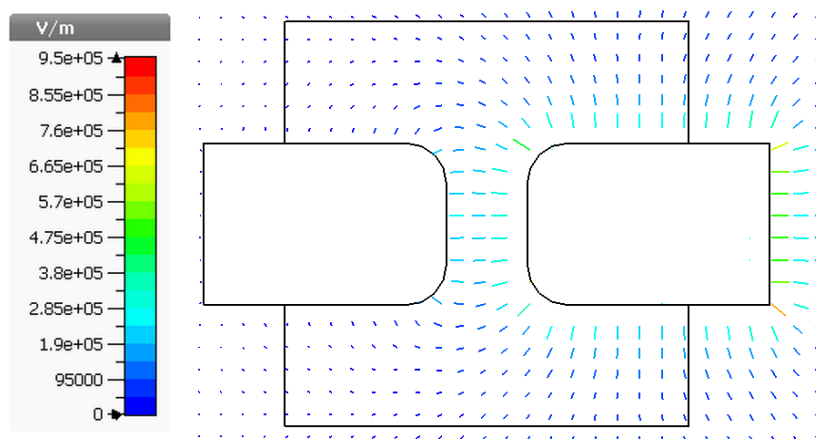
Pred začatím jedného meracieho kola sa elektródy vyhotovené z medenej pásky prilepili na neporušenú časť vzorky s dostatočným odstupom od okrajov a hrán. Pre dodržanie konštantných rozmerov elektród bola v programe Eagle navrhnutá šablóna s hrúbkou

8 mm a polomerom zaoblenia 2 mm, podľa ktorej boli nastrihané všetky použité elektródy. Tie sa nalepili rovnobežne na vzorky pomocou separátoru s šírkou 4 mm. Ilustrácia elektródového systému je na obrázku 4.2.



Obrázok 4.2: Rozmery použitých elektród

Dodatočne bola vytvorená simulácia tvaru elektrického poľa na povrchu vzorky Kaptonu s novou topológiou elektród, ktorej výsledok je na obrázku 4.3. Ďalšie simulácie pre túto topológiu elektród sú uvedené v prílohe.



Obrázok 4.3: Tvar elektrického poľa s použitím

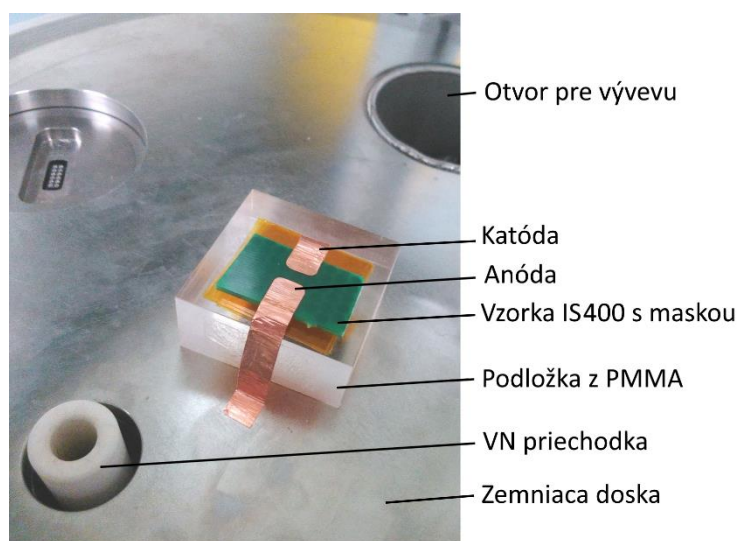
Po nalepení elektród na vzorku sa jej povrch v blízkosti elektród dôkladne očistil pomocou isopropyl alkoholu. Vzorka sa položila na 2 cm vysokú podložku z polymetylmakrylátu. Jedna z elektród sa spojila s kovovým dnom komory a druhá elektróda sa prostredníctvom izolovaného vodiča prechádzajúceho cez zabudovanú keramickú priechodku v dne komory spojila s výstupom vysokonapäťového zdroja. Príklad vzorky (IS400) pripravenej na meranie možno vidieť na obrázku 4.4.

Komora sa uzavrela a spustilo sa čerpanie vákua. Prúdové obmedzenie zdroja sa nastavilo na 25  $\mu\text{A}$ . Tým sa dosiahla minimálna miera degradácie vzoriek a na jednom mieste vzorky mohlo byť meranie opakované niekoľkokrát. Po ustálení tlaku v komore na určitej úrovni sa postupne zvyšovalo napätie, kým nenastal prieraz. Podmienkou pre určenie prierazu bola prúdová amplitúda aspoň 10  $\mu\text{A}$ . Hodnoty prierazného napätia sa zaznamenali do tabuľky nameraných hodnôt v programe Excel. Následne sa pomocou ihlicového ventilu nastavil tlak na ďalšiu úroveň a meranie sa takto opakovalo, kým nedošlo k degradácii vzorky. Potom bolo potrebné elektródy prelepiť na neporušenú časť vzorky, prípadne vzorku vymeniť.

Pri experimentálnom meraní v oblasti tlakov pod 10 Pa sa prejavili dva druhy prierazu, čiastočný a úplný. Tieto údaje sa zaznamenávali do dvoch samostatných tabuliek. Zo siedmich nameraných hodnôt pri danom tlaku sa vybralo päť hodnôt s najnižšou smerodajnou odchýlkou, z ktorých sa následne spočítal priemer. Pre každý materiál boli vytvorené grafy závislostí priemerného prierazného napätia na tlaku v komore. V grafoch boli význačné 3 oblasti: oblasť, v ktorej prevládal povrchový prieraz s výraznými degradačnými účinkami na povrch vzoriek (4 mPa – 1 Pa), prechodová oblasť (2 – 10 Pa) a oblasť, v ktorej sa prevažne uplatňoval Paschenov zákon pričom v okolí katódy dochádzalo k viditeľnej ionizácii vzduchu (15 – 50 Pa). Hodnoty tlaku sú v grafoch uvedené v obrátenom poradí a v logaritmickej mierke.

Úplný prieraz bol charakteristický silnými degradačnými účinkami. Ich špičkové prúdy dosahovali hodnoty nad 150  $\mu\text{A}$ . Za úplný prieraz bola považovaná taktiež séria rýchlo opakujúcich sa výbojov s časovým rozstupom menším ako 100 ms. Pri zaznamenaní úplného prierazu bol okamžite vypnutý zdroj napätia tlačidlom STOP, aby nedošlo k nadmernej degradácii vzorky. Tieto merania bolo možné na jednej vzorke opakovať približne štyrikrát, kým sa nevytvoril trvalý vodivý kanál medzi elektródami. To sa prejavilo plynulým nárastom prúdu už pri nižších napätiach.

Za čiastočný prieraz bol považovaný jednorazový alebo oscilujúci výboj s amplitúdou 7,5 až 150  $\mu\text{A}$ . Pri niektorých materiáloch nebolo možné jednoznačne identifikovať čiastočné prierazy z dôvodu príliš nízkej amplitúdy. Čiastočné prierazy obvykle odznali v čase do 200 ms. Ich degradačné účinky na vzorky boli minimálne. V oblasti tlaku pod 2 Pa mal dočasný výboj často oscilačný charakter, a pri ďalšom zvyšovaní napätia sa obvykle neopakoval. Pri tlakoch 5 až 10 Pa sa zaznamenala hodnota napätia, pri ktorom nastal prvý výboj. V oblasti tlakov nad 10 Pa už čiastočné prierazy nebolo možné rozlíšiť od úplných prierazov a pri niektorých materiáloch boli zaznamenané iba do tlaku 7 Pa. Pre pozorovanie čiastočných prierazov na osciloskope bolo najčastejšie použité rozlíšenie 5 V na dielik.



Obrázok 4.4: Uloženie vzorky vo vnútri komory

## 4.2 Výsledky meraní

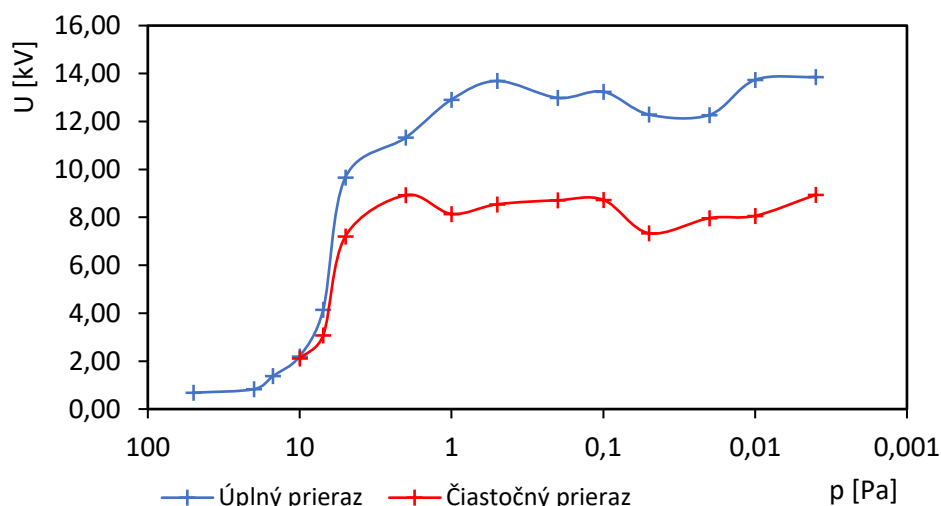
Pre každý skúmaný materiál boli okrem grafických charakteristík spočítané i smerodajné odchýlky k príslušnému súboru hodnôt. Ďalej sú v tabuľkách ku každému meraniu uvedené aj najmenšie namerané hodnoty prierazného napätia.

Z meraní bol vylúčený materiál Rogers RO4003C pretože sa uňho predpokladajú podobné vlastnosti ako v prípade PVDF, ktorý má rovnakú hodnotu CTI. Miesto neho bol použitý materiál Kapton HN, ktorý sa častejšie používa vo vákuovej technike a má vysokú elektrickú pevnosť.

### 4.2.1 Ketron 1000 PEEK

Vzorka materiálu Ketron 1000 PEEK vykazovala nižšiu až strednú odolnosť voči degradačným účinkom vysokého napätia v porovnaní s ostatnými skúmanými materiálmi. Obvykle degradovala až po piatom úplnom priereze. Zaujímavosťou tohto materiálu bol veľký rozdiel medzi napätím čiastočných a úplných prierazov v oblasti tlaku do 1 Pa. Najmenší zistený rozdiel bol pri tlaku 0,2 Pa a to 4,27 kV.

Prierazy pri tlaku menšom ako 5 Pa sa prejavili ako strmé a opakujúce sa prúdové impulzy. Mali teda charakter čistého prierazu. Priemerná hodnota prierazného napätia v oblasti tlakov do 1 Pa sa pohybovala od 12,27 kV do 13,86 kV. Na grafe 4.4 je v smere k nižším tlakom vidno mierne rastúcu závislosť napätia úplných prierazov. Najnižšia zaznamenaná hodnota prierazného napätia v tejto oblasti bola 10,04 kV. V prechodovej oblasti so znižujúcim sa tlakom narastalo priemerné prierazné napätie od 2,2 kV až na 11,33 kV.



Obrázok 4.5: Závislosť prierazného napätia na tlaku pre PEEK

Čiastočné prierazy bolo často potrebné sledovať pri rozlíšení 2 V na dielik, pretože neboli jasne identifikovateľné. Na obrázku 4.6 je zachytený oscilujúci priebeh čiastočného prierazu. V prechodnej oblasti s klesajúcim tlakom rástli hodnoty napätia čiastočných prierazov od 2,11 do 8,93 kV. V oblasti tlakov do 1 Pa sa ich hodnoty pohybovali v rozmedzí 7,34 až 8,94 kV, bez výraznej rastúcej či klesajúcej tendencie.

Tabuľka 4.1: Prehľad výsledkov merania na vzorke PEEK

p [Pa]	Úplný prieraz			Čiastočný prieraz		
	U <sub>MIN</sub> [kV]	U <sub>A</sub> [kV]	U <sub>D</sub> [kV]	U <sub>MIN</sub> [kV]	U <sub>A</sub> [kV]	U <sub>D</sub> [kV]
50	0,56	0,68	0,10	-	-	-
20	0,72	0,83	0,10	-	-	-
15	0,84	1,38	0,09	-	-	-
10	1,92	2,20	0,03	1,68	2,11	0,25
7	3,60	4,14	0,37	2,88	3,08	0,14
5	6,80	9,66	0,43	5,76	7,21	0,81
2	10,48	11,33	0,35	7,68	8,93	1,05
1	10,04	12,91	0,81	7,84	8,14	0,13
0,5	10,72	13,69	0,85	7,72	8,54	0,11
0,2	12,32	12,98	0,65	7,88	8,71	0,10
0,1	12,24	13,24	0,72	7,68	8,73	0,09
0,05	10,40	12,29	0,35	7,24	7,34	0,11
0,02	10,40	12,27	0,97	7,80	7,97	0,10
0,01	10,32	13,74	0,84	7,96	8,06	0,15
0,004	11,24	13,86	0,89	7,40	8,94	1,08



Obrázok 4.6: Čiastočný prieraz s oscilujúcim charakterom u vzorky PEEK s amplitúdou 20  $\mu$ A pri tlaku 0,02 Pa

#### 4.2.2 Sylamit 1000 PVDF

Materiál Sylamit 1000 PVDF mal podobne ako Ketron 1000 PEEK nízku až strednú odolnosť voči degradácii povrchu spôsobenej vplyvom výboja. Na obrázku 4.7 je vidieť, že povrch vzorky degradoval najmä v okolí katódy. Výboje pritom nevznikali iba v zaoblených rohoch elektród, kde bol najvyšší gradient elektrického poľa a taktiež neprechádzali najkratšou možnou cestou. Podobné správanie bolo pozorované aj u iných materiálov, predovšetkým u Aluminu. Charakteristiky pre úplný a čiastočný prieraz získané meraním sú na obrázku 4.8.

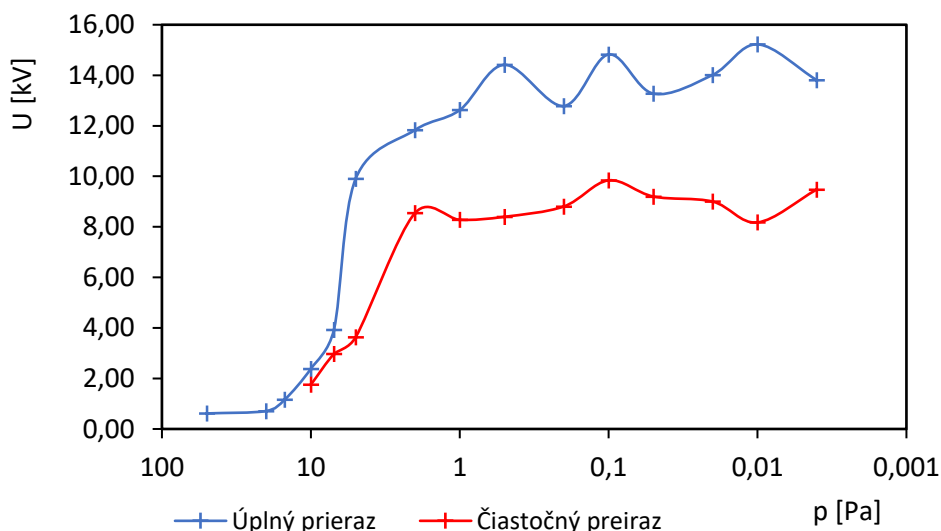




Obrázok 4.7: Degradácia PVDF vplyvom povrchového priarazu  
a) vzorka pred meraním, b) vzorka po desiatich priarazoch

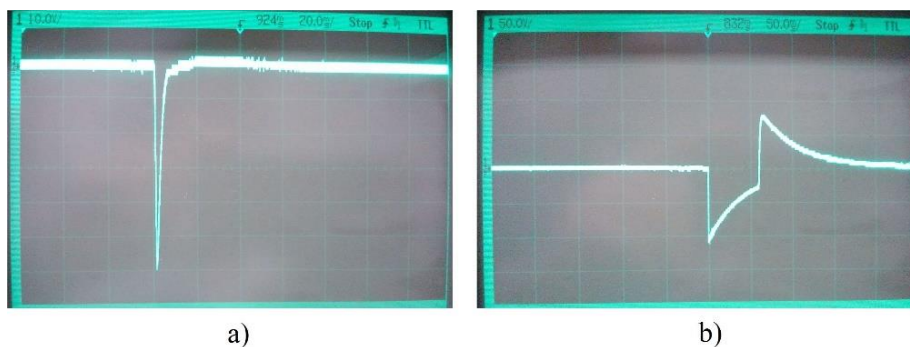
V prechodnej oblasti dochádzalo k úplným priarazom pri hodnotách napätia 2,38 až 11,83 kV. Priemerná hodnota priarazného napätia pri tlaku menšom ako 1 Pa bola 13,87 kV. Hodnoty v tejto oblasti sa pohybovali od 12,62 do 15,22 kV. Preto sa predpokladá, že tento materiál má mierne vyššiu odolnosť voči úplnému povrchovému priarazu vo vákuu než Ketron 1000 PEEK. V smere k nižším tlakom mala závislosť priarazného napätia mierne rastúci charakter.

Čiastočné priarazy sa v prechodnej oblasti začali prejavovať už pri napätí 1,75 kV a so znižujúcim tlakom toto napätie rástlo až na 8,54 kV. Pri tlakoch menších ako 1 Pa sa čiastočné výboje objavovali v intervale napätí od 8,18 do 9,84 kV, pričom závislosť mala mierne rastúci charakter v smere k nižším tlakom. Výrazné zvlnenie charakteristiky je pravdepodobne spôsobené rozptylom nameraných hodnôt.



Obrázok 4.8: Závislosť priarazného napätia na tlaku pre PVDF

Na obrázku 4.9 je vidieť rozdiel medzi čiastočným a úplným priarazom, pozorovanom na povrchu materiálu PVDF. Čiastočný priaraz mal prúdovú amplitúdu takmer 150  $\mu$ A a odznel do 10 ms. Tento priaraz sa pri ďalšom zvyšovaní napätia neopakoval. Na druhej strane úplný priaraz mal amplitúdu väčšiu ako 250  $\mu$ A a bol zastavený až vypnutím zdroja v čase 60 ms. Vypnutie zdroja je v tomto prípade zreteľne vidieť v mieste strmého prechodu prúdu zo záporných do kladných hodnôt.



Obrázok 4.9: Rozdielne priebehy prierazov PVDF na osciloskope  
a) čiastočný prieraz, b) úplný prieraz

Tabuľka 4.2: Prehľad výsledkov merania na vzorke PVDF

p [Pa]	Úplný prieraz			Čiastočný prieraz		
	U <sub>MIN</sub> [kV]	U <sub>A</sub> [kV]	U <sub>D</sub> [kV]	U <sub>MIN</sub> [kV]	U <sub>A</sub> [kV]	U <sub>D</sub> [kV]
50	0,60	0,62	0,02	-	-	-
20	0,64	0,71	0,03	-	-	-
15	0,96	1,16	0,03	-	-	-
10	2,12	2,38	0,19	1,44	1,75	0,18
7	3,52	3,93	0,14	2,20	2,97	0,56
5	7,76	9,90	0,57	2,88	3,63	0,64
2	9,68	11,83	1,82	7,92	8,54	0,42
1	12,08	12,62	0,65	7,60	8,28	0,59
0,5	12,00	14,42	0,78	6,80	8,40	0,44
0,2	11,36	12,78	1,32	6,92	8,81	0,69
0,1	12,40	14,82	1,21	8,40	9,84	0,69
0,05	12,40	13,27	0,84	8,20	9,20	0,62
0,02	10,80	14,02	1,28	7,64	9,00	0,59
0,01	14,04	15,22	0,83	7,28	8,18	0,72
0,004	11,36	13,81	1,88	9,16	9,48	0,35

### 4.2.3 Isola IS400

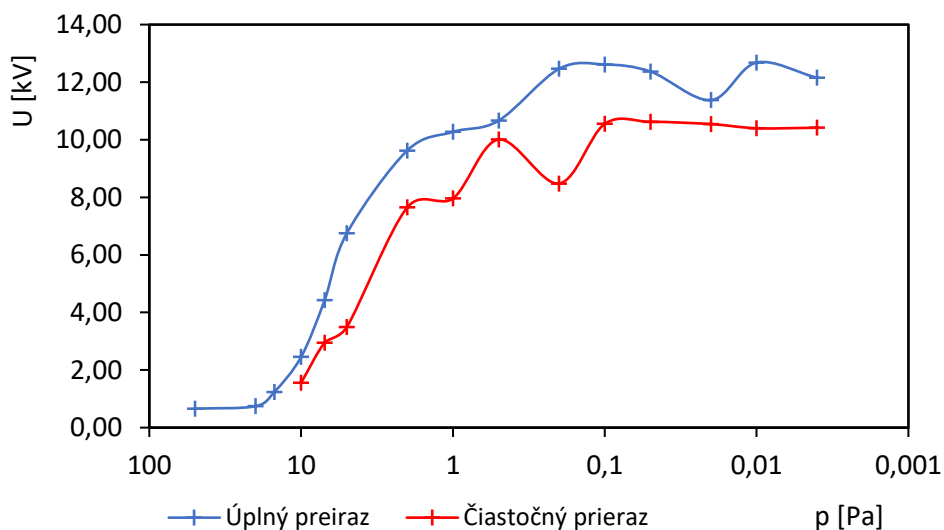
Meranie pre tento materiál bolo realizované pre vzorky bez masky i s nespájkovacou maskou. Merania boli spracované samostatne, aby bolo možné posúdiť vplyv masky na odolnosť tohto materiálu voči povrchovému prierazu. Odolnosť voči degradácii pri úplnom prieraze bola veľmi slabá. Pri tlakoch menších ako 0,1 Pa vzorka často vydržala iba asi 3 úplné prierazy, po ktorých bola pre ďalšie merania nepoužiteľná. Degradáciu v okolí zaobleného rohu katódy možno vidieť na obrázku 4.10. Stmavnuté oblasti, v ktorých pôsobil výboj, majú parabolický tvar.

Napätie, pri ktorom dochádzalo k úplnému prierazu rástlo so znižujúcim sa tlakom až do hodnoty tlaku 0,1 Pa, u ktorej dosiahlo 12,62 kV. Pri nižších tlakoch prierazné napätie ďalej výrazne nerástlo a ustálilo sa približne na 12,5 kV. V prechodnej oblasti sa prierazné napätie menilo v intervale od 2,46 do 9,62 kV.



Obrázok 4.10: Detail miesta na povrchu IS400 v blízkosti elektródy, kde pôsobením výbojov došlo k degradácii

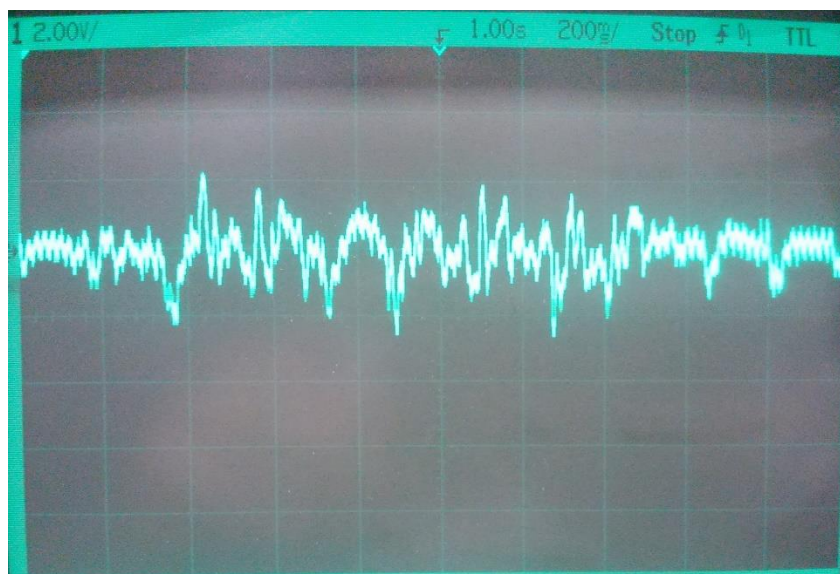
Rozdiely medzi napätím, pri ktorom došlo k úplnému a čiastočnému prerazu boli výrazne menšie ako v prípade materiálov PEEK, PVDF či Alumina. V oblasti nízkeho tlaku bol najmenší zaznamenaný rozdiel medzi týmito napätiami 0,65 kV a to pri tlaku 0,5 Pa. Ako vidieť na obrázku 4.11, k čiastočným prerazom pri veľmi nízkych tlakoch dochádzalo takmer vždy pri napätí okolo 10,5 kV.



Obrázok 4.11: Závislosť prirazného napätia na tlaku pre IS400

Na úrovni tlaku 5 Pa bol vykonaný experiment, počas ktorého sa zaznamenalo kolísanie prúdu pri plynulej zmene napätia z 800 na 1500 V. Fotografia záznamu osciloskopu je na obrázku 4.12. Najvyššia prúdová odchýlka bola 6  $\mu$ A. K podobnému kolísaniu prúdu dochádzalo v menšej miere aj v prípade iných materiálov. Toto kolísanie komplikovalo rozpoznávanie slabých čiastočných prirazov v prechodnej oblasti. Toto mohlo byť príčinou toho, že pri tlaku 2 Pa mala smerodajná odchýlka z piatich vybraných hodnôt veľkosť až 1,45 kV.





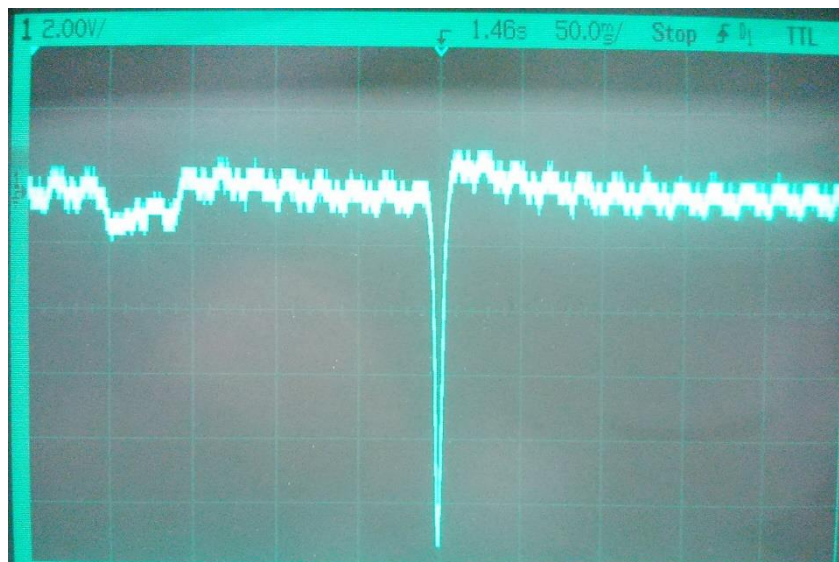
Obrázok 4.12: Kolísanie prúdu pri zmene napätia z 800 na 1500 V

Tabuľka 4.3: Prehľad výsledkov merania na vzorke IS400

p [Pa]	Úplný prieraz			Čiastočný prieraz		
	U <sub>MIN</sub> [kV]	U <sub>A</sub> [kV]	U <sub>D</sub> [kV]	U <sub>MIN</sub> [kV]	U <sub>A</sub> [kV]	U <sub>D</sub> [kV]
50	0,6	0,66	0,02	-	-	-
20	0,68	0,74	0,04	-	-	-
15	0,84	1,24	0,07	-	-	-
10	1,92	2,46	0,18	0,92	1,56	0,32
7	4	4,43	0,30	2,24	2,95	0,40
5	6,16	6,75	0,42	3,2	3,50	0,21
2	7,92	9,62	0,74	6	7,65	1,45
1	8,32	10,27	0,50	6,76	7,96	1,12
0,5	9,64	10,66	0,60	6,88	10,01	1,16
0,2	8,4	12,46	0,93	7,76	8,48	0,86
0,1	11,72	12,62	0,60	9	10,55	0,18
0,05	8,8	12,37	0,71	8	10,62	0,30
0,02	10,32	11,38	0,78	7,64	10,54	0,42
0,01	10,88	12,68	0,36	9,16	10,40	0,37
0,004	11,28	12,15	0,67	10,32	10,42	0,06

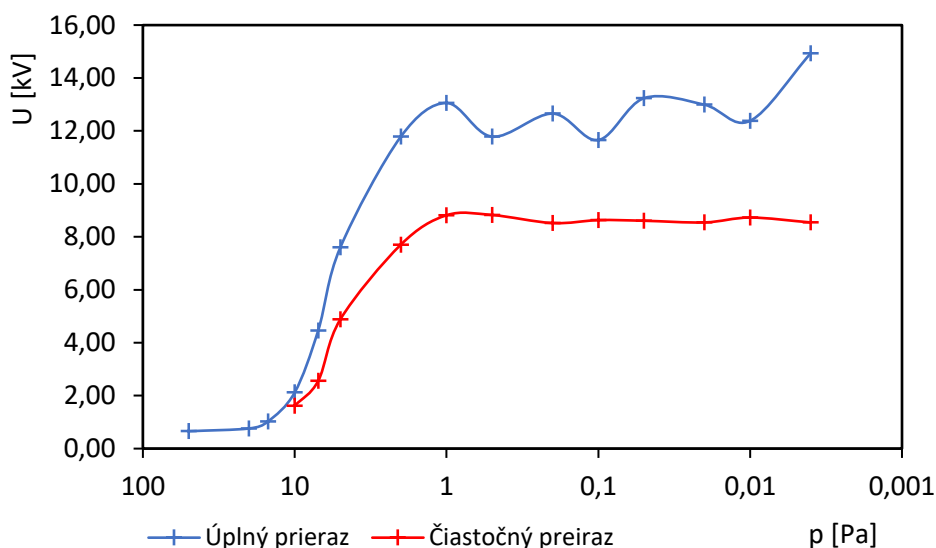
#### 4.2.4 Vplyv nespájkovacej masky na IS400

Pri meraní vzoriek IS400 s nespájkovacou maskou bolo pozorovaných viacero zásadných odlišností. Vzorky s maskou obvykle vydržali asi o jeden úplný prieraz viac, kým zdegradovali tak, že nebolo na nich možné ďalej merať. Ďalej sa zlepšila rozlíšiteľnosť čiastočných prierazov v prechodnej oblasti, pretože sa zmiernilo kolísanie prúdu a čiastočné prierazy vyvolávali výraznejšie prúdové špičky. Na obrázku 4.13 je vidieť záznam čiastočného prierazu pri tlaku 10 Pa, ktorého prúdová amplitúda bola približne 28  $\mu$ A a odznel v čase 25 ms.



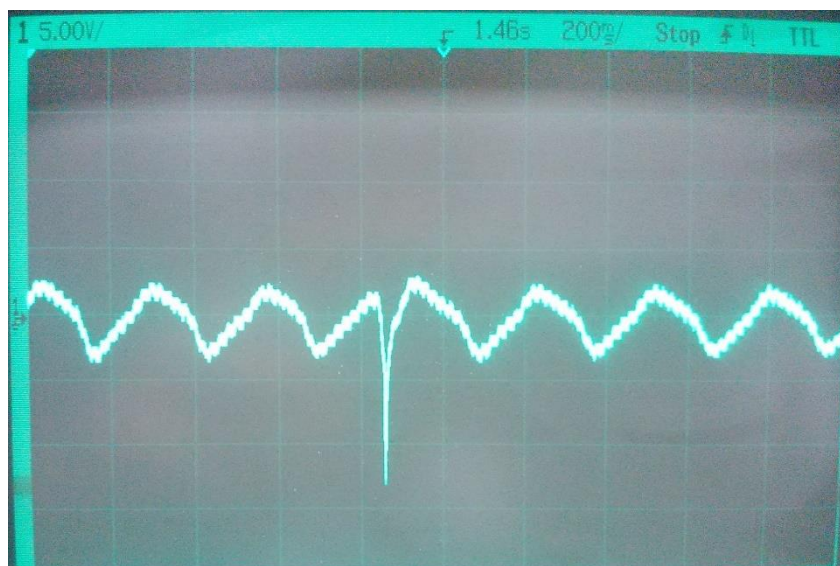
Obrázok 4.13: Čiastočný prieraz IS400 s nespájkovacou maskou pri 10 Pa

Nespájkovacia maska v oblasti veľmi nízkych tlakov výrazne rozšírila napät'ový rozdiel medzi charakteristikami úplných a čiastočných prierazov. Pri tlakoch menších ako 1 Pa bol najmenší rozdiel týchto napätí 2,96 kV. V grafe na obrázku 4.14 je ďalej vidieť, že v celej tejto oblasti dochádzalo k čiastočným prierazom pri napätí približne 8,6 kV. Taktiež závislosť pre úplný prieraz má skôr konštantný charakter a prierazné napätie sa v tejto oblasti pohybovalo kolo 12,5 kV.



Obrázok 4.14: Závislosť prierazného napätia na tlaku pre IS400 s maskou

Pri tlaku 15 Pa bol na hranici prierazného napätia bol pomocou osciloskopu zachytený jav, pri ktorom dochádzalo k periodickej oscilácii prúdu s amplitúdou približne 7,5  $\mu$ A a frekvenciou 3,6 Hz. Na zázname, ktorý je na obrázku 4.15, je taktiež zachytený čiastočný prieraz s amplitúdou približne 38  $\mu$ A, ktorý predĺžil dobu jedného z kmitov o približne 120 ms.



Obrázok 4.15: Periodické kmity pri tlaku 15 Pa na rozhraní prierazného napätia u vzorky IS400 bez nespájkovacej masky

Tabuľka 4.4: Prehľad výsledkov merania na vzorke Isola IS400 s maskou

p [Pa]	Úplný prieraz			Čiastočný prieraz		
	U <sub>MIN</sub> [kV]	U <sub>A</sub> [kV]	U <sub>D</sub> [kV]	U <sub>MIN</sub> [kV]	U <sub>A</sub> [kV]	U <sub>D</sub> [kV]
50	0,56	0,66	0,02	-	-	-
20	0,68	0,76	0,04	-	-	-
15	0,96	1,02	0,09	-	-	-
10	2,00	2,12	0,10	1,52	1,62	0,10
7	4,24	4,46	0,17	1,84	2,56	0,33
5	5,68	7,61	0,67	3,76	4,89	0,62
2	8,00	11,78	1,22	5,80	7,70	1,19
1	10,44	13,06	0,62	8,36	8,82	0,64
0,5	6,64	11,78	1,62	8,28	8,82	0,47
0,2	8,40	12,66	0,80	6,48	8,52	0,46
0,1	9,36	11,66	0,76	7,68	8,63	0,48
0,05	9,92	13,24	0,86	7,84	8,61	0,22
0,02	12,08	12,99	0,90	8,00	8,54	0,62
0,01	12,04	12,38	0,27	8,16	8,73	0,46
0,004	12,16	14,93	0,98	7,84	8,54	0,30

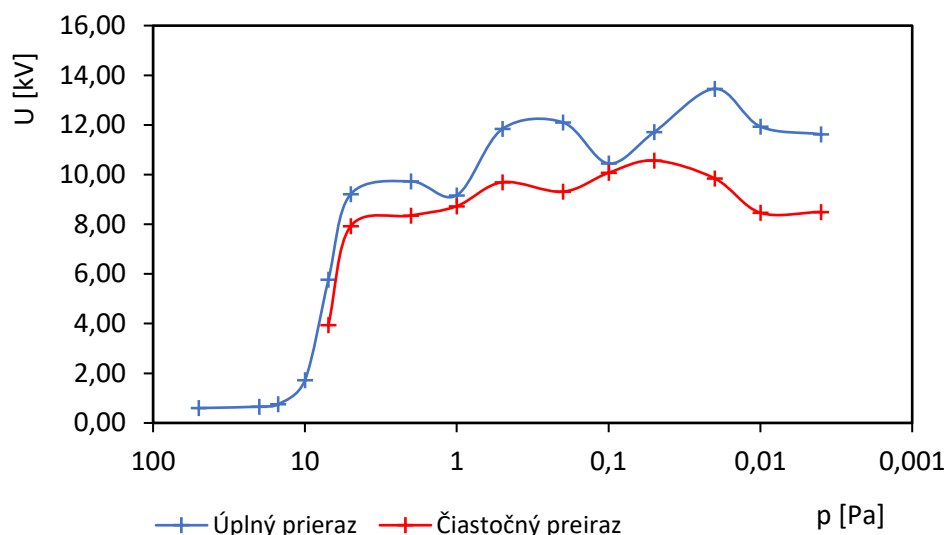
#### 4.2.5 Kapton HN

Dôležitou zistenou vlastnosťou materiálu Kapton HN je veľmi malý napäťový rozdiel medzi úplným a čiastočným prierazom. Pri tlaku 0,1 Pa bol tento rozdiel iba 0,38 kV. Počas meraní sa občas stalo, že pár sekúnd po čiastočnom prieraze s oscilačným charakterom došlo k úplnému prierazu a to aj bez toho, aby sa zvýšilo pôsobiacie napätie na elektródach.

Charakteristika úplných prierazov mala v smere k nižším tlakom rastúci charakter až po tlak 0,5 Pa, kde dosiahla úroveň 11,84 kV. Pri nižších tlakoch už viac nemala rastúci

trend. Prierné napätie v oblasti tlakov pod 1 Pa sa pohybovalo v intervale 9,17 až 13,46 kV pre úplný prieraz, a 8,46 až 10,57 kV v prípade čiastočného prierazu.

V prechodnej oblasti pre tlak 10 Pa neboli zachytené žiadne čiastočné prierazy a dochádzalo priamo k úplnému prierazu. Preto v tabuľke 4.16 tieto hodnoty nie sú uvedené. Napätie, pri ktorom došlo k úplným prierazom sa v prechodnej oblasti pohybovalo v intervale 1,72 až 9,73 kV.

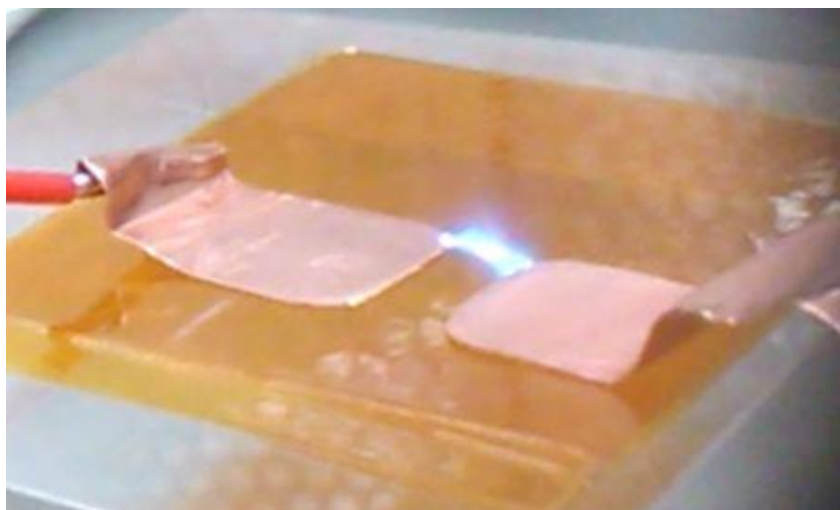


Obrázok 4.16: Závislosť prierného napätia na tlaku Kapton

Na obrázku 4.17 je zachytený prieraz na povrchu vzorky Kaptonovej pásky. Je vidieť, že trajektória prierazu je mierne zaoblená a prechádza od rohu katódy (vľavo) k protiľahlému rohu anódy (vpravo). Toto je v súlade s výsledkami simulácie rozloženia intenzity elektrického poľa na povrchu vzorky.

Tabuľka 4.5: Prehľad výsledkov merania na vzorke Kapton

p [Pa]	Úplný prieraz			Čiastočný prieraz		
	U <sub>MIN</sub> [kV]	U <sub>A</sub> [kV]	U <sub>D</sub> [kV]	U <sub>MIN</sub> [kV]	U <sub>A</sub> [kV]	U <sub>D</sub> [kV]
50	0,60	0,60	0,00	-	-	-
20	0,60	0,66	0,04	-	-	-
15	0,72	0,75	0,02	-	-	-
10	1,28	1,72	0,09	-	-	-
7	5,08	5,77	0,62	2,96	3,94	0,32
5	8,08	9,21	0,37	7,04	7,92	0,47
2	9,2	9,73	0,67	5,28	8,35	0,89
1	8,76	9,17	0,80	8,36	8,73	0,19
0,5	10,96	11,84	0,65	8,2	9,70	0,09
0,2	11,2	12,10	0,89	8,48	9,31	0,20
0,1	10,08	10,45	0,46	9,96	10,07	0,08
0,05	10,4	11,71	0,78	8,08	10,57	1,11
0,02	10,16	13,46	0,68	6,32	9,85	0,45
0,01	10,56	11,94	0,82	8,4	8,46	0,05
0,004	11,12	11,62	0,84	8	8,50	0,26



*Obrázok 4.17: Prieraz na povrchu vzorky Kaptonu*

#### 4.2.6 Alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

Podobne ako IS400 mala Alumina slabú odolnosť voči degradácii pri úplnom prieraze. Obrázok 4.18 zosnímaný pomocou mikroskopu zachytáva degradáciu vzorky Aluminy. Okraje elektród po ich odlepení sú zvýraznené vďaka zvyškom adhézy z medenej pásky. Zaujímavosťou je výrazne začernená oblasť, ktorá sa vytvorila počas niekoľkosekundového pôsobenia elektrického výboja. Ďalej na nej je možné pozorovať trajektórie výbojov, ktoré prechádzali predovšetkým v oblasti medzi elektródami. Niektoré z nich ale vôbec nesmerovali k protiľahlej elektróde tak, ako sa očakávalo.

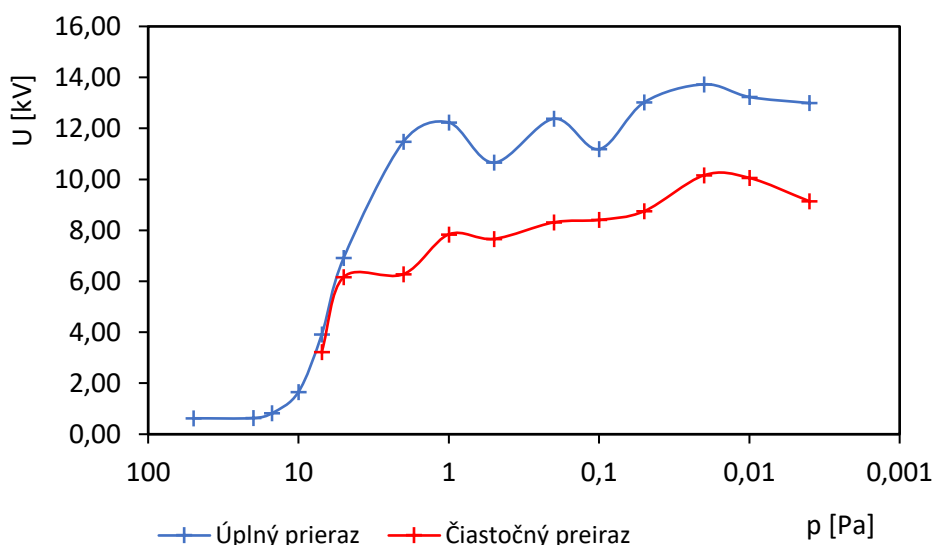


*Obrázok 4.18: Snímka zdegradovanej oblasti na vzorke Aluminy*

Počas iného merania na ďalšom mieste vzorky sa po predchádzajúcom úplnom prieraze objavili pri viacerých napäťových úrovniach viaceré čiastočné prierazy s veľmi silnou amplitúdou, kým nedošlo k ďalšiemu úplnému prierazu.



V grafe na obrázku 4.19 sú napäťové závislosti úplných i čiastočných prierazov na tlaku vzduchu v komore. Obe závislosti majú v smere k nižším tlakom rastúci a podobný trend v celej oblasti tlakov menších ako 1 Pa. Prierazné napätie sa v tejto oblasti pohybovalo od 10,66 do 13,73 kV pre úplné prierazy, a v intervale 7,66 až 10,16 kV v prípade čiastočných prierazov. Medzi oboma charakteristikami je dostatočne veľký napäťový odstup. Najmenší rozdiel napätí medzi čiastočným a úplným prierazom je 2,77 kV pri tlaku 0,1 Pa. V prechodnej oblasti rástlo napätie úplného prierazu z 1,66 až na 11,48 kV. Ďalej je vidieť, že charakteristika úplného prierazu je v intervale 1 až 0,05 Pa výrazne zvlnená. Vzhľadom na hodnoty smerodajných odchýlok uvedených v tabuľke 4.7 je toto zvlnenie pravdepodobne zapríčinené chybami merania.



Obrázok 4.19: Závislosť prierazného napätia na tlaku pre Aluminu

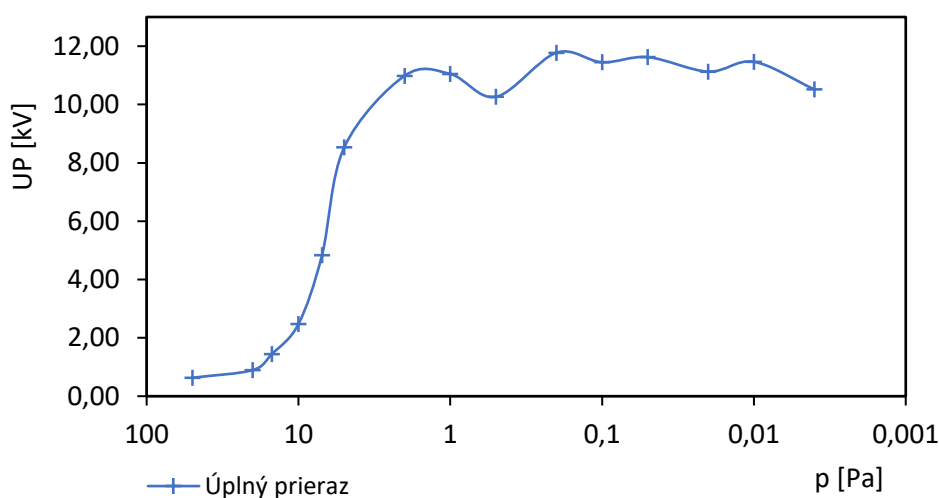
Tabuľka 4.6: Prehľad výsledkov merania na vzorke Aluminu

p [Pa]	Úplný prieraz			Čiastočný prieraz		
	U <sub>MIN</sub> [kV]	U <sub>A</sub> [kV]	U <sub>D</sub> [kV]	U <sub>MIN</sub> [kV]	U <sub>A</sub> [kV]	U <sub>D</sub> [kV]
50	0,60	0,62	0,02	-	-	-
20	0,60	0,63	0,02	-	-	-
15	0,76	0,82	0,02	-	-	-
10	1,52	1,66	0,06	-	-	-
7	3,32	3,91	0,29	2,88	3,22	0,21
5	6,12	6,92	0,31	4,80	6,17	0,18
2	8,96	11,48	0,70	5,28	6,28	0,52
1	10,8	12,23	0,93	7,72	7,84	0,11
0,5	10,08	10,66	0,61	6,84	7,66	0,12
0,2	11,2	12,38	0,30	7,84	8,31	0,25
0,1	9,72	11,18	1,08	6,32	8,41	0,29
0,05	12,00	13,02	0,86	7,36	8,75	0,23
0,02	10,88	13,73	0,93	8,48	10,16	0,46
0,01	10,72	13,23	1,27	8,32	10,06	0,37
0,004	11,12	12,99	1,49	8,16	9,14	0,16

### 4.2.7 Sklo

Sklo bolo jediným materiálom, u ktorého nebolo možné spoľahlivo zachytiť čiastočné výboje. Pri väčšine meraní sa čiastočné výboje vôbec neobjavili, takže nebolo možné zozbierať dostatočne veľký štatistický súbor hodnôt. Preto sa charakteristiky čiastočných prierazov v tabuľke 4.7 ani na obrátke 4.20 nenachádzajú. Na povrchu skla dochádzalo k zaujímavému javu, ktorý je zachytený na obrázku v prílohe. Miestom emisie elektrónov nebol trojitý bod, ale bolo od katódy vzdialené približne 1 mm v smere k anóde.

Sklo vynikalo medzi ostatnými materiálmi dobrou odolnosťou voči degradačným účinkom elektrického výboja. Na druhej strane sa však jeho prierazné napätie v oblasti pod 1 Pa pohybovalo iba od 10,26 do 11,78 kV a v smere k nižším tlakom ďalej nerástlo. V prechodnej oblasti bolo jeho prierazné napätie 2,47 až 10,98 kV.



Obrázok 4.20: Závislosť prierazného napätia na povrchu skla

Tabuľka 4.7: Prehľad výsledkov merania na vzorkách skla

p [Pa]	Úplný prieraz		
	U <sub>MIN</sub> [kV]	U <sub>A</sub> [kV]	U <sub>D</sub> [kV]
50	0,56	0,63	0,05
20	0,84	0,90	0,06
15	1,28	1,44	0,13
10	2,04	2,47	0,15
7	3,24	4,83	0,64
5	6,08	8,53	0,37
2	8,72	10,98	1,02
1	9,40	11,05	0,48
0,5	9,76	10,26	0,55
0,2	9,12	11,78	0,77
0,1	8,40	11,93	1,95
0,05	9,04	11,62	1,00
0,02	9,60	11,13	1,07
0,01	10,64	11,46	0,44
0,004	10,00	10,52	0,58

## Záver

Hlavným cieľom tejto práce bolo charakterizovať viaceré izolačné materiály pri rôznych úrovniach vákua z hľadiska ich odolnosti voči povrchovému prierazu. Boli vybrané materiály, ktoré sú často používané pri vývoji elektronických zariadení vo vákuovej technike, konkrétne v elektrónovej mikroskopii.

Najskôr bolo potrebné navrhnuť vhodnú meraciu metódu pre experimentálne merania s ohľadom na časovú a finančnú nenáročnosť experimentov. Ako meracie elektródy sa použili 2 pásy medenej pásky, na ktoré sa priviedlo jednosmerné vysoké napätie. Pri návrhu geometrie meracích elektród sa vychádzalo z teoretických poznatkov o skúškach elektrickej pevnosti a CTI, ktoré sa vykonávajú pri normálnych atmosférických podmienkach. Taktiež boli vytvorené simulácie elektrického poľa na povrchu vzoriek pre rôzne elektródové usporiadania, aby bolo možné odhadnúť najpravdepodobnejšie miesta vzniku a smery šírenia elektrického výboja. Ďalej bol realizovaný približný výpočet Paschenovej krivky v oblasti jej minima. Ten napomohol pri odhade najvyššieho tlaku, pre ktorý malo meranie povrchového prierazu zmysel.

Merania prebiehali vo vákuovanej komore pri tlakoch 4 mPa až 50 Pa. Charakteristiky prierazného napätia na tlaku boli vytvorené z priemeru piatich nameraných hodnôt v každom vybranom bode. Z uvažovaných materiálov bol vylúčený materiál RO4003C. Namiesto neho bol charakterizovaný Kapton HN, ktorý sa vo vákuovej technike používa častejšie. Pri niektorých meraniach boli pomocou videokamery zachytené snímky, ktoré sa nachádzajú v prílohe B.1.

Pri meraní bolo pozorovaných niekoľko javov, ku ktorým dochádzalo na povrchu vzoriek. Pri nízkom vákuu sa nad katódou tvoril mrak ionizovaného plynu. Pri nižších tlakoch k tomuto javu viac nedochádzalo a začali sa objavovať povrchové a podpovrchové prierazy viacerých druhov. Prvé z nich boli čiastočné prierazy, ku ktorým mohlo dôjsť v plynových dutinkách materiálov. Pretože čiastočné prierazy mali nízku amplitúdu, krátky a neopakujúci sa priebeh, je možné predpokladať, že nepredstavujú vysoké riziko poškodenia elektronických zariadení, ktoré sú chránené voči elektrostatickým výbojom. Môžu ale zhoršiť validitu meraní a dátových prenosov. Výrazne vyššie riziko predstavujú úplné prierazy, ktoré mali väčšiu prúdovú amplitúdu a dlhodobý alebo opakujúci sa priebeh v čase. Obvykle sa prejavili viditeľným zábleskom na povrchu vzoriek. Posledným pozorovaným javom bola kontinuálna emisia elektrónov, ku ktorej dochádzalo najčastejšie na rozhraní bočných hrán elektród a skúmaných vzoriek. Prejavovala sa postupným nárastom prúdu a emisiou žiarenia v bode jej vzniku.

Spomedzi všetkých skúmaných materiálov mali pri tlaku vzduchu menšom ako 1 Pa najvyššiu odolnosť voči úplnému prierazu materiály Sylamit 1000 PVDF a Ketron 1000 PEEK. Ich prierazné napätie bolo väčšie ako 12 kV. Tieto materiály pritom podľa hodnôt ich CTI patria do úplne rozdielnych kategórií. To značí, že hodnota CTI nemusí byť pre výber materiálu v elektrónovej mikroskopii rozhodujúca. Prekvapivo dobrú odolnosť mal materiál Isola IS400, u ktorého podobne ako v prípade Aluminy sa



priemerné povrchové prierazné napätie pohybovalo nad úrovňou 11 kV. Nespájkovacia maska na povrchu IS400 mala za následok zníženie a stabilizáciu napätia, pri ktorom dochádzalo k čiastočným prierazom. Taktiež zvýšila jej odolnosť voči úplným prierazom v oblasti tlakov 0,5 až 5 Pa, čo je dôležitá vlastnosť pre použitie v nízkom vákuu. Sklo sa spomedzi všetkých materiálov vyznačovalo tým, že uňho takmer vôbec nedochádzalo k čiastočným prierazom. Pre tlaky od 4 mPa do 2 Pa malo jeho prierazné napätie na povrchu veľmi stabilnú hodnotu okolo 11 kV. Malo taktiež dobrú odolnosť voči prierazu už pri tlaku 5 Pa. Napriek vysokej elektrickej pevnosti mal Kapton HN slabšiu odolnosť voči povrchovému prierazu než ostatné skúmané materiály. Ďalej pri tomto materiáli v prípade výskytu čiastočného prierazu hrozí i následný úplný prieraz. Avšak, v smere k nižším tlakom sa objavili náznaky zlepšenia jeho odolnosti voči povrchovému prierazu, preto by mohol byť vhodným materiálom pre veľmi vysoké vákuum.

Výsledky tejto práce sú aplikovateľné pri návrhu elektronických zariadení pracujúcich v komorovom vákuu. V elektrónovej mikroskopii, kde sa používa vysoké napätie pre riadenie rýchlosti elektrónov je potrebné vhodným elektrickým izolantom oddeliť detektory sekundárnych a spätne odrazených elektrónov. Pri návrhu takýchto zariadení je možné na základe nameraných výsledkov a aplikačných požiadaviek vybrať vhodný izolačný materiál. Z pohľadu odolnosti voči povrchovému prierazu sú pre najnáročnejšie aplikácie v širokom rozsahu pracovných tlakov najvhodnejšie materiály PVDF a PEEK.

Ďalšie práce v tejto oblasti môžu byť zamerané na zefektívnenie meraní, rozšírenie štatistického súboru a spresnenie meraní, charakterizáciu iných materiálov a bližšie preskúmanie: vplyvu geometrie elektród, vplyv geometrie povrchu, správania sa materiálov v prechodnej oblasti, odolnosti materiálu Kapton voči VN pri veľmi vysokom vákuu a fenoménu čiastočných prierazov.

## Zoznam symbolov, veličín a skratiek

$\alpha$	Ionizačný činiteľ
$\gamma$	Koeficient sekundárnej emisie elektrónov
$\varepsilon$	Permitivita
$\rho$	Merný odpor (rezistivita)
$\operatorname{tg} \delta$	Činiteľ strát
$E_p$	Elektrická pevnosť
$U_z$	Zápalné napätie
$\text{Al}_2\text{O}_3$	Oxid hlinitý
CTI	Comparative tracking index (odolnosť voči plazivým prúdom)
ČSN	Česká technická norma
DPS	Doska plošných spojov
IEC	Medzinárodná elektrotechnická komisia
PEEK	Polyéteréterketon
PMMA	Polymetylmetakrylat
PVDF	Polyvinyliden fluorid
UL94	Štandard pre testovanie horľavosti plastových materiálov pre diely v zariadeniach a spotrebičoch
VN	Vysoké napätie

# Zoznam obrázkov

Obrázok 1.1: Komplexná permitivita a jej zložky .....	8
Obrázok 2.1: Fotoionizácia plynu .....	11
Obrázok 2.2: Vodivosť plynu v silných elektrických poliach .....	11
Obrázok 2.3: Nárazová ionizácia a lavínový efekt. ....	12
Obrázok 2.4: Paschenova krivka .....	13
Obrázok 2.5: Najkratšia priama a povrchová trasa výboja. [8] .....	16
Obrázok 2.6: Elektródový systém pre meranie elektrickej pevnosti. ....	17
Obrázok 2.7: Elektródový systém pre meranie elektrickej pevnosti v smere rovnobežnom s povrchom vzorky .....	17
Obrázok 2.8: Elektródová sústava CTI testu 1- platinová elektróda, 2- mosadzné prívody, 3- stôl, 4- špička kvapkadla, 5- vzorka testovaného materiálu, 6- sklenená podložka [16] .....	18
Obrázok 3.1: Závislosť prieražného napätia na tlaku plynu. ....	20
Obrázok 3.2: Geometrický model s hranolovými elektródami .....	21
Obrázok 3.3: Rozloženie intenzity elektrického poľa na povrchu vzorky Aluminy pre hranolové elektródy .....	22
Obrázok 3.4: Rozloženie intenzity elektrického poľa na povrchu vzorky Aluminy pre páskové elektródy .....	22
Obrázok 3.5: Rozloženie intenzity elektrického poľa na povrchu RO4003C pre hranolové elektródy .....	23
Obrázok 3.6: Rozloženie intenzity elektrického poľa na povrchu RO4003C pre páskové elektródy .....	23
Obrázok 4.1: Fotografia meracej sústavy .....	24
Obrázok 4.2: Rozmery použitých elektród .....	25
Obrázok 4.3: Tvar elektrického poľa s použitím .....	25
Obrázok 4.4: Uloženie vzorky vo vnútri komory .....	26
Obrázok 4.5: Závislosť prieražného napätia na tlaku pre PEEK .....	27
Obrázok 4.6: Čiastočný prieraz s oscilujúcim charakterom u vzorky PEEK .....	28
Obrázok 4.7: Degradácia PVDF vplyvom povrchového prierazu a) vzorka pred meraním, b) vzorka po desiatich prierazoch .....	29
Obrázok 4.8: Závislosť prieražného napätia na tlaku pre PVDF .....	29

Obrázok 4.9: Rozdielne priebehy prierazov PVDF na osciloskope a) čiastočný prieraz, b) úplný prieraz .....	30
Obrázok 4.10: Detail miesta na povrchu IS400 v blízkosti elektródy, kde pôsobením výbojov došlo k degradácií .....	31
Obrázok 4.11: Závislosť prierazného napätia na tlaku pre IS400 .....	31
Obrázok 4.12: Kolísanie prúdu pri zmene napätia z 800 na 1500 V .....	32
Obrázok 4.13: Čiastočný prieraz IS400 s nespájkovacou maskou pri 10 Pa.....	33
Obrázok 4.14: Závislosť prierazného napätia na tlaku pre IS400 s maskou .....	33
Obrázok 4.15: Periodické kmity pri tlaku 15 Pa na rozhraní prierazného napätia u vzorky IS400 bez nespájkovacej masky .....	34
Obrázok 4.16: Závislosť prierazného napätia na tlaku Kapton .....	35
Obrázok 4.17: Pieraz na povrchu vzorky Kaptonu .....	36
Obrázok 4.18: Snímok zdegradovanej oblasti na vzorke Aluminy .....	36
Obrázok 4.19: Závislosť prierazného napätia na tlaku pre Aluminu.....	37
Obrázok 4.20: Závislosť prierazného napätia na povrchu skla.....	38

# Zoznam tabuliek

Tabuľka 1.1 Prehľad elektrických vlastností skúmaných materiálov .....	10
Tabuľka 2.1: Charakteristické hodnoty minima prieražného napätia a súčinu tlaku a vzdialenosti (p·d). [3] .....	13
Tabuľka 2.2 Kategorizácia materiálu po CTI teste. [8] .....	18
Tabuľka 3.1: Geometrické rozmery použitých modelov .....	20
Tabuľka 4.1: Prehľad výsledkov merania na vzorke PEEK .....	28
Tabuľka 4.2: Prehľad výsledkov merania na vzorke PVDF .....	30
Tabuľka 4.3: Prehľad výsledkov merania na vzorke IS400 .....	32
Tabuľka 4.4: Prehľad výsledkov merania na vzorke Isola IS400 s maskou.....	34
Tabuľka 4.5: Prehľad výsledkov merania na vzorke Kapton .....	35
Tabuľka 4.6: Prehľad výsledkov merania na vzorke Aluminy .....	37
Tabuľka 4.7: Prehľad výsledkov merania na vzorkách skla .....	38

# Zoznam literatúry

- [1] RAVINDRA ARORA, Wolfgang Mosch. a Wolfgang MOSCH. *High voltage and electrical insulation engineering*. 1. Hoboken, NJ: J. Wiley and Sons, 2011. ISBN 978-047-0947-890.
- [2] MENTLÍK, Václav. Dielektrické prvky a systémy. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-730-0189-6.
- [3] Jiráček, J., Autrata, R., Liedermann, K., Rozsivalová, Z., Sedlaříková, M.: Materiály a technická dokumentace, část Materiály v elektrotechnice. Elektronické texty, Brno 2002.
- [4] *Ketron® PEEK* [online]. Tíelt: Quadrant group of companies, 2007 [cit. 2016-11-28]. Dostupné z: <http://www.quadrantplastics.com/eu-en/products/machinable-plastics/advanced-160-220-c/ketron-R-peek.html>
- [5] *Ketron 1000 PEEK: Product data sheet* [online]. Tíelt: Quadrant group of companies, 2014 [cit. 2016-11-28]. Dostupné z: [http://media.quadrantplastics.com/fileadmin/quadrant/documents/QEPP/EU/Product\\_Data\\_Sheets\\_PDF/AEP/Ketron\\_1000\\_PEEK\\_PDS\\_E\\_25042014.pdf](http://media.quadrantplastics.com/fileadmin/quadrant/documents/QEPP/EU/Product_Data_Sheets_PDF/AEP/Ketron_1000_PEEK_PDS_E_25042014.pdf)
- [6] *Symalit 1000 PVDF: Product data sheet* [online]. Tíelt: Quadrant group of companies, 2011 [cit. 2016-11-28]. Dostupné z: [http://www.quadrantplastics.com/fileadmin/quadrant/documents/QEPP/EU/Product\\_Data\\_Sheets\\_PDF/Symalit/Symalit\\_1000\\_PVDF\\_E\\_PDS\\_2011.pdf](http://www.quadrantplastics.com/fileadmin/quadrant/documents/QEPP/EU/Product_Data_Sheets_PDF/Symalit/Symalit_1000_PVDF_E_PDS_2011.pdf)
- [7] IS400 High Performance Laminate and Prepreg: Data sheet [online]. Chandler, Arizona: Isola Group, 2016 [cit. 2016-11-29]. Dostupné z: <http://www.isola-group.com/wp-content/uploads/2016/04/IS400-High-Performance-Laminate-and-Prepreg-Data-Sheet-Isola.pdf>
- [8] *RO4000 Laminates: Data sheet* [online]. Chandler, Arizona: Rogers Corporation, 2015 [cit. 2016-11-29]. Dostupné z: <http://www.rogerscorp.com/documents/726/acs/RO4000-LaminatesData-sheet.pdf>
- [9] Summary of Properties for Kapton® Polyimide Films. *DuPont* [online]. Wilmington, Delaware: DuPont, 2017 [cit. 2017-05-12]. Dostupné z: <http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/membranes-and-films/polyimide-films/documents/DEC-Kapton-summary-of-properties.pdf>
- [10] *Aluminum Oxide, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Ceramic Properties* [online]. Phillipsburg: Accuratus Corporation, 2013 [cit. 2016-12-14]. Dostupné z: <http://accuratus.com/alumox.html>

- [11] NUNNALLY, W.C., M. KROGH, C. WILLIAMS, F. ALLEN, D. TRIMBLE, S. SAMPAYAN a G. CAPORASO. Investigation of vacuum insulator surface dielectric strength with nanosecond pulses. *Digest of Technical Papers. PPC-2003. 14th IEEE International Pulsed Power Conference (IEEE Cat. No.03CH37472)*. Dallas: IEEE, 2003, 301-304. DOI: 10.1109/PPC.2003.1277715. ISBN 0-7803-7915-2. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/1277715>
- [12] WETZER, J.M. a P.A.A.F. WOUTERS. HV design of vacuum components. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 1995, 2(2), 202-209. DOI: 10.1109/94.388241. ISSN 10709878. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/388241>
- [13] Power package electrical isolation design. LIU, Yong. *Power electronic packaging design, assembly process, reliability and modeling*. 2012. New York: Springer, 2012, s. 9-26. ISBN 9781461410539.
- [14] TOMMASINI, Davide. Dielectric Insulation & High Voltage Issues. In: *CERN Accelerator School* [online]. Bruges: CERN, 2009 [cit. 2016-10-19]. Dostupné z: <http://cas.web.cern.ch/cas/Belgium-2009/Lectures/PDFs/Tommasini.pdf>
- [15] *Electrical Safety and Isolation in High Voltage Applications: Application note* [online]. Neubiberg: Infineon Technologies AG, 2012 [cit. 2016-12-03]. Dostupné z: <http://www.infineon.com/dgdl/Infineon+-+Application+Note+-+PowerMOSFETs+-+CoolMOS%E2%84%A2+-+Electrical+Safety+and+Isolation+in+high+voltage+Applications.pdf?fileId=db3a30433d1d0bbe013d20e0cbf017fe>
- [16] LELÁK, J. Meranie elektrickej pevnosti izolantov. In: *MatNet* [online]. Bratislava: SAV, 2006 [cit. 2016-12-10]. Dostupné z: <http://www.matnet.sav.sk>
- [17] CTI: The Comparative Tracking Index Test. In: *3M Science. Applied to Life*. [online]. Austin: 3M Electrical Markets Division, 2016 [cit. 2016-12-07]. Dostupné z: <http://multimedia.3m.com/mws/media/1289893O/tech-brief-comparative-tracking-index-test.pdf>
- [18] IEC 60112. Method for the determination of the proof and the comparative tracking indices of solid insulating materials. 4. Geneva: International Electrotechnical Commission, 2003.
- [19] BERZAK, L. F., S. E. DORFMAN a S. P. SMITH. Paschen's Law in Air and Noble Gases. *Berkely lab* [online]. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratory, 2006 [cit. 2016-12-13]. Dostupné z: [http://www-eng.lbl.gov/~shuman/XENON/REFERENCES&OTHER\\_MISC/paschen\\_report.pdf](http://www-eng.lbl.gov/~shuman/XENON/REFERENCES&OTHER_MISC/paschen_report.pdf)

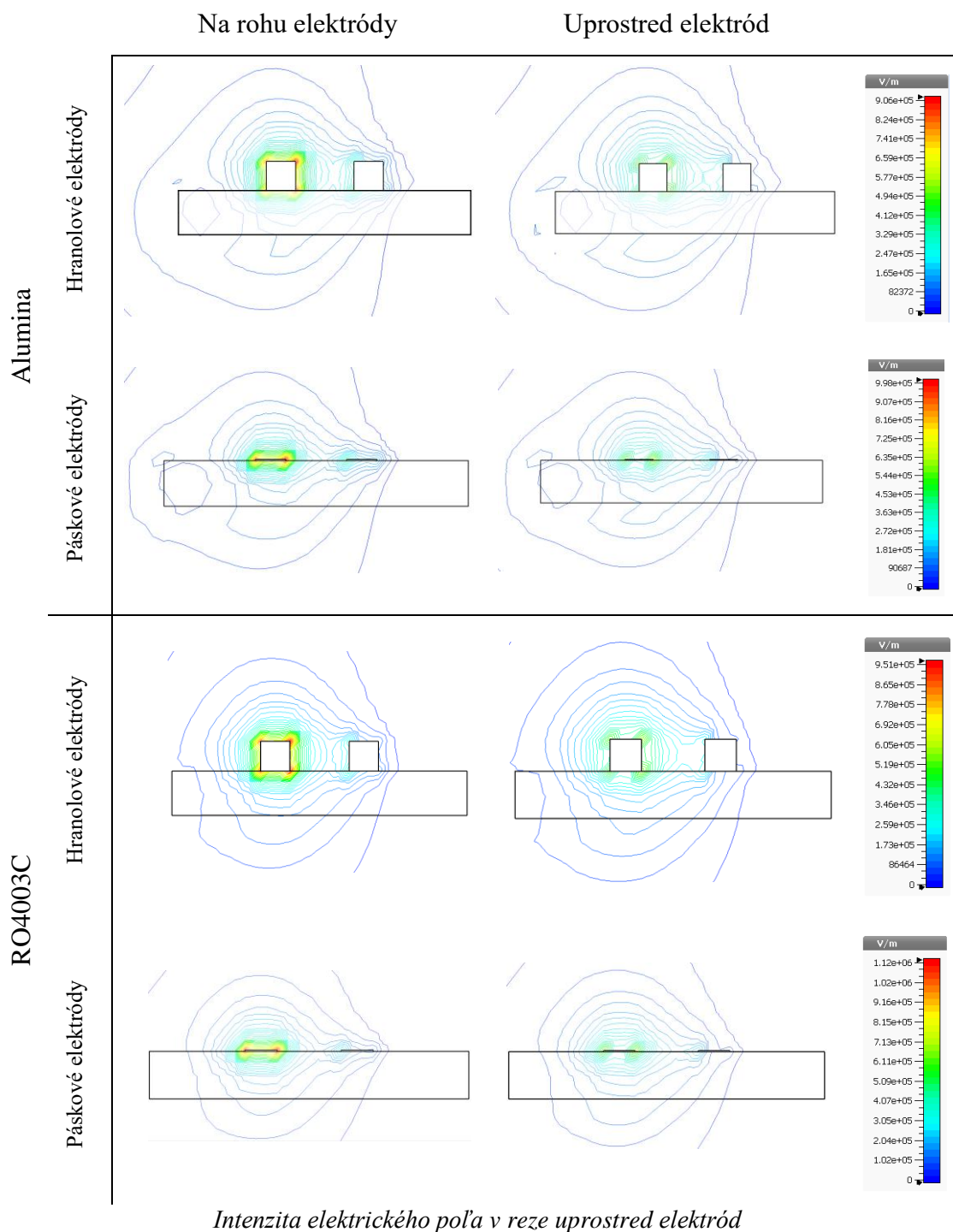
# Zoznam príloh

A	Výsledky simulácií elektrického poľa pre napätie na elektródach 1200 V .....	I
A.1	Intenzita elektrického poľa v reze kolmom na elektródy .....	I
A.2	Intenzita elektrického poľa v okolí povrchu izolantu.....	II
A.3	Intenzita elektrického poľa na povrchu izolantu s tvarom použitých elektród ...	III
A.4	Intenzita elektrického poľa na povrchu izolantu pre potenciál okolia 600 V .....	IV
B	Fotografie z meraní .....	V
B.1	Vybrané snímky z kamerových záznamov .....	V
B.2	Zaujímavé javy pozorované na osciloskope.....	VII

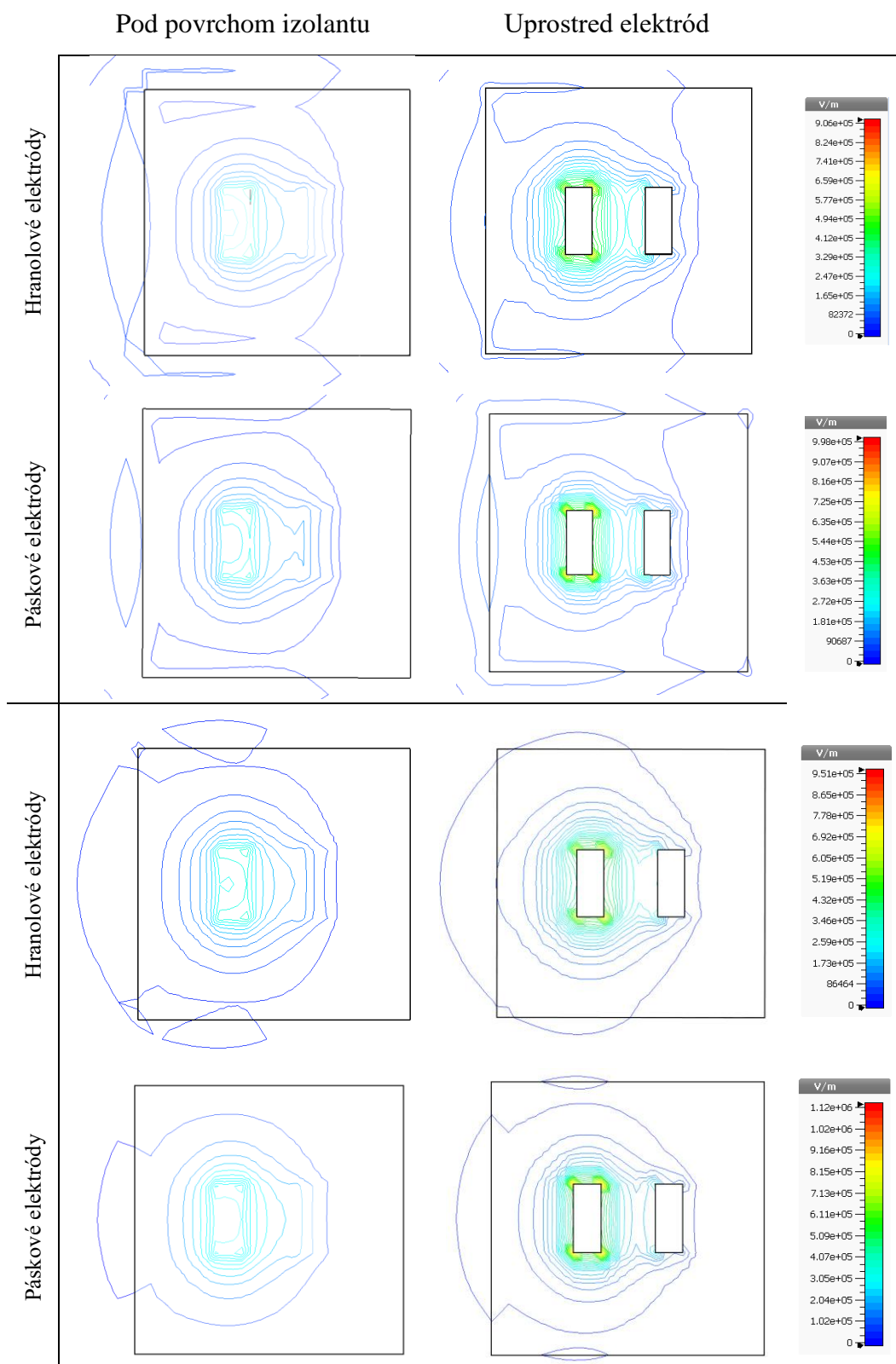


# A Výsledky simulácií elektrického poľa pre napätie na elektródach 1200 V

## A.1 Intenzita elektrického poľa v reze kolmom na elektródy

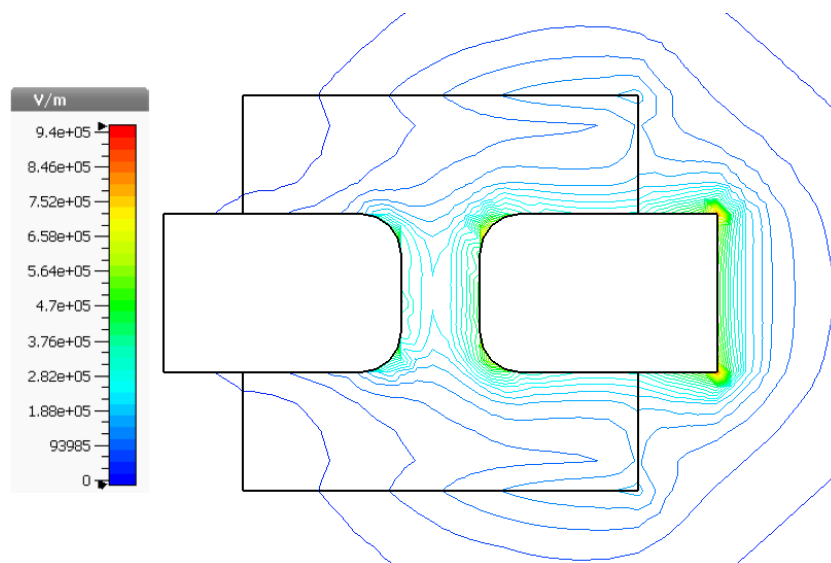


## A.2 Intenzita elektrického poľa v okolí povrchu izolantu

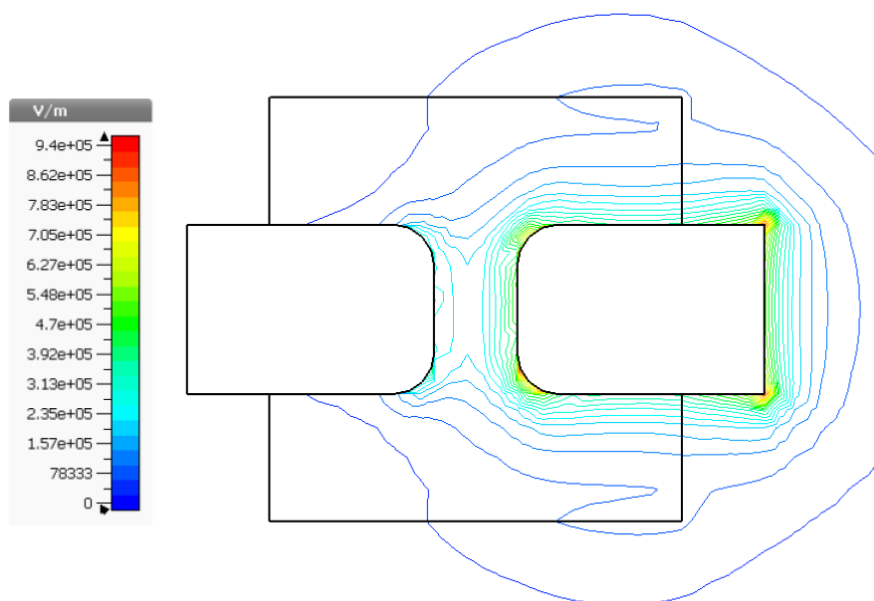


*Intenzita elektrického poľa pri povrchu izolantu.*

### A.3 Intenzita elektrického poľa na povrchu izolantu s tvarom použitých elektród

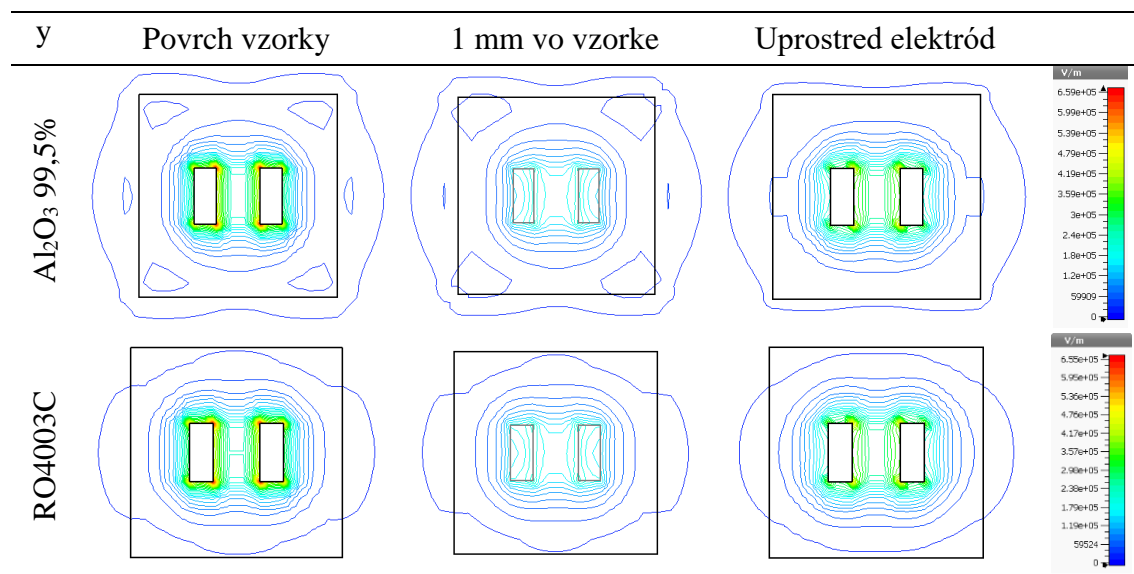


*Rozloženie intenzity elektrického poľa na povrchu vzorky Aluminy pre páskové elektródy so zaoblenými rohmi*

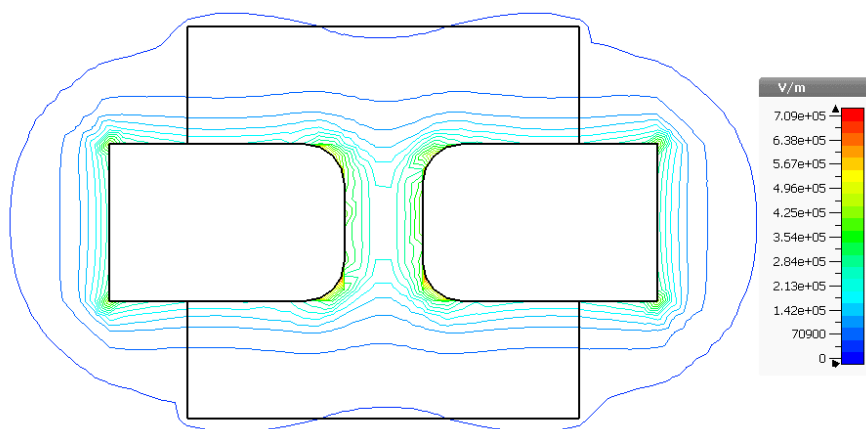


*Rozloženie intenzity elektrického poľa na povrchu vzorky Kaptonu pre páskové elektródy so zaoblenými rohmi*

## A.4 Intenzita elektrického poľa na povrchu izolantu pre potenciál okolia 600 V



*Intenzita elektrického poľa na povrchu izolantu,  
pre prípad hranolových elektród s potenciálu okolia 600 V*



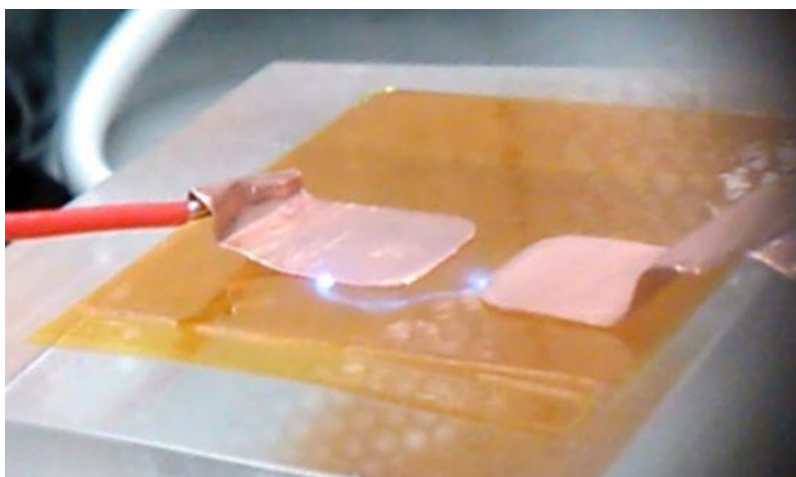
*Rozloženie intenzity elektrického poľa na povrchu vzorky Kaptonu pre tvar elektród použitý  
v experimentálnom meraní a s potenciálom okolia 600 V.*

## B Fotografie z meraní

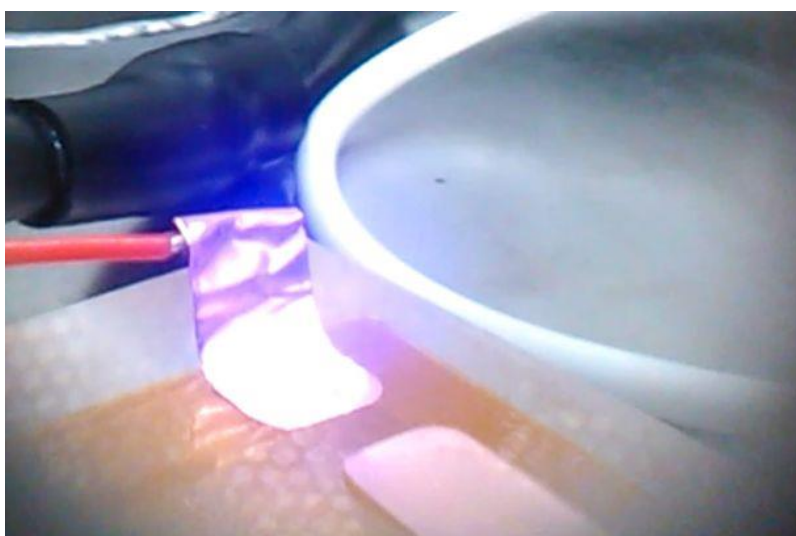
### B.1 Vybrané snímky z kamerových záznamov



*Výboj na povrchu PVDF v dvoch miestach súčasne*



*Výboj vychádzajúci z bočnej hrany katódy k rohu anódy*



*Ionizácia okolitého plynu nad katódou pri tlaku 20 Pa*



*Emisia elektrónov z bočných hrán katódy*



*Výboje v rôznych smeroch na povrchu Alumíny.*



*Emisia elektrónov v mieste uprostred elektród a výboj na strane katódy*



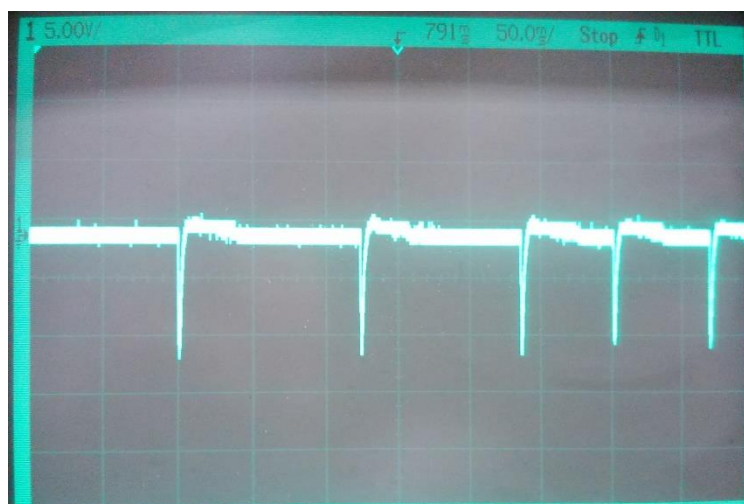
## B.2 Zaujímavé javy pozorované na osciloskope



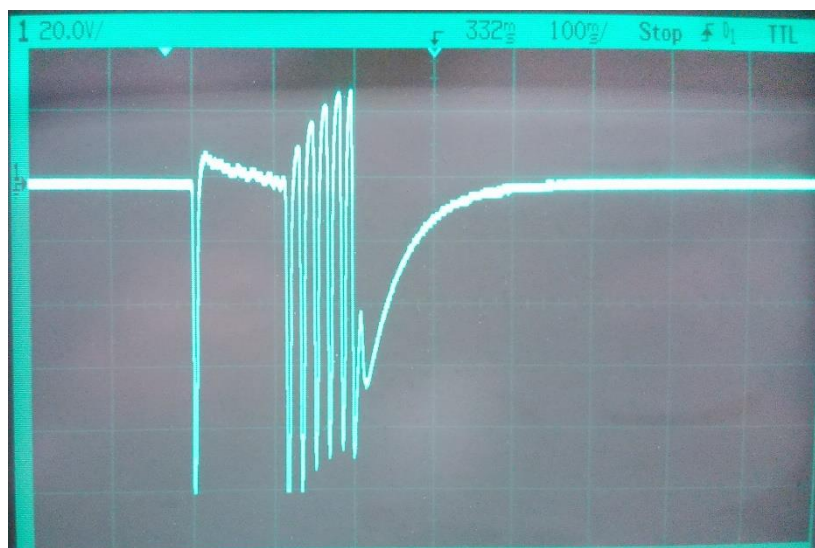
*Krátky oscilujúci čiastočný prieraz na IS400 bez masky pri tlaku 0,01 Pa, s dobou trvania do 60 ms a amplitúdou 37  $\mu$ A*



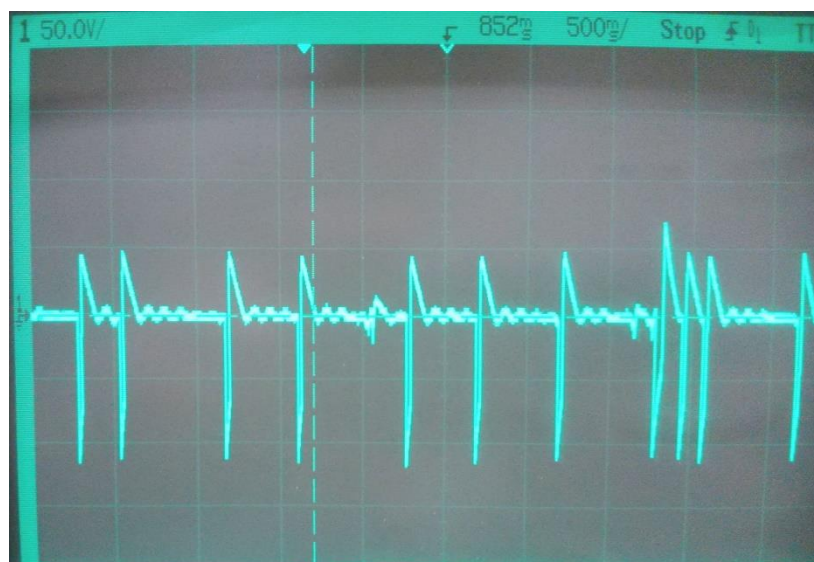
*Oscilujúci čiastočný prieraz vzorky z Kaptonu, ktorý trval viac ako 150 ms a mal prúdovú amplitúdu 23  $\mu$ A*



*Nepravidelne opakujúce sa prúdové impulzy na vzorke Kaptonu, pri napätí okolo 600V tlaku 50 Pa.*



*Úplný prieraz PVDF s rýchlo opakujúcimi sa prúdovými impulzmi s amplitúdou  $250\ \mu\text{A}$*



*Opakujúce sa úplné prierazy Kaptonu s amplitúdou nad  $275\ \mu\text{A}$ ,  
a s najkratším intervalom opakovania väčším ako  $100\ \text{ms}$*